UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SOLUÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DE DIFUSÃO EM COORDENADAS CILÍNDRICAS COM CONDIÇÃO DE CONTORNO DE DIRICHLET VARIÁVEL APLICADA A PASTEURIZAÇÃO DA POLPA DA GRAVIOLA

AUTOR: Luís Eduardo Araújo Santos

ORIENTADOR(ES): Prof.ª Drª.Vera Solange de Oliveira Farias
Prof. Dr. Aluízio Freire da Silva Junior

CAMPINA GRANDE – PB
MAIO 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SOLUÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DE DIFUSÃO EM COORDENADAS CILÍNDRICAS COM CONDIÇÃO DE CONTORNO DE DIRICHLET VARIÁVEL APLICADA A PASTEURIZAÇÃO DA POLPA DA GRAVIOLA

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

AUTOR: Luís Eduardo Araújo Santos

ORIENTADOR(ES): Prof.ª Dr.ª Vera Solange de Oliveira Farias
Prof. Dr. Aluízio Freire da Silva Junior

CAMPINA GRANDE – PB
MAIO DE 2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

S237s Santos, Luís Eduardo Araújo.

Solução numérica da equação de difusão em coordenadas cilíndricas com condição de contorno de Dirichlet variável aplicada a pasteurização da polpa da graviola / Luís Eduardo Araújo Santos. – 2026.

289 f. : il. color.

Tese (doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

"Orientação: Profa. Dra. Vera Solange de Oliveira Farias, Prof. Dr. Aluízio Freire da Silva Junior".

Referências.

1. Engenharia de Processos. 2. Pasteurização – Polpa de Graviola. 3. Difusividade Térmica. 4. Geometria Cilíndrica. 5. Transferência de Calor. 6. Volumes Finitos. 7. Simulação Numérica. I. Farias, Vera Solange de Oliveira. II. Silva Junior, Aluízio Freire da. III. Título.

UFCG/BC CDU 66.0(043.3)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **LUÍS EDUARDO ARAÚJO SANTOS** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 18 de maio de 2026

Documento assinado digitalmente
gov.br VERA SOLANGE DE OLIVEIRA FARIAS
Data: 16/06/2026 15:28:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof(a). Drª. Vera Solange de Oliveira Farias (Orientadora)
UFCG/ CCT/PPEP

Prof. Dr. Aluízio Freire da Silva Junior (Orientador)
UFCG/CES/UAFM

Documento assinado digitalmente
gov.br LEIDJANE MATOS DE SOUTO
Data: 14/06/2026 16:23:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof(a). Drª. Leidjane Matos de Souto (Examinador Externo)
UFCG/CES/UAFM

Documento assinado digitalmente
gov.br CELIA MARIA RUFINO FRANCO LEITE
Data: 13/06/2026 10:00:57-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof(a). Drª. Célia Maria Rufino Franco Leite (Examinador Externo)
UFCG/CES/UAFM

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataide (Examinador Externo)
UFCG/CES/UAFM

Prof(a). Drª. Vanessa Bordin Vieira (Examinador Externo)
UFCG/CES/UAFM

CAMPINA GRANDE, PB
MAIO DE 2026

O presente exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, desenvolvida por Luís Eduardo Araújo Santos, aprovada pela Banca Examinadora em 18 de maio de 2026.

gov.br Documento assinado digitalmente
VERA SOLANGE DE OLIVEIRA FARIAS
Data: 16/05/2026 15:23:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof(a). Drª. Vera Solange de Oliveira Farias (Orientadora)
UFCG/ CCT/PPEP

Aluízio Freire da Silva Junior

Prof. Dr. Aluízio Freire da Silva Junior (Orientador)
UFCG/CES/UAFM

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado:

A Deus, por me conceder força, sabedoria e por transformar em possível aquilo que muitas vezes pareceu impossível em minha vida.

Aos meus pais, José Lopes dos Santos e Eunice Araújo Santos, minha eterna gratidão por nunca terem desistido de nos ensinar, mesmo diante das grandes dificuldades da vida. Com fé, coragem e muito amor, sempre colocaram a educação e a formação moral dos filhos em primeiro lugar, sendo exemplos de perseverança, união e dignidade. Com suas atitudes, ensinaram que, com Deus e bons valores, é possível vencer qualquer dificuldade e seguir em frente com esperança.

À minha esposa, Luciene Barbosa, pelo companheirismo, incentivo constante e orações ao longo desses anos de luta.

Aos seus filhos, Samuel, Ester, Laíse e Luana, por serem a maior razão de seu esforço, pela confiança, inspiração diária e por ensinarem, com amor, o verdadeiro sentido da perseverança; a Vinícius, pelo apoio e incentivo durante esta caminhada; e aos queridos netos, Isabella Vitória e Nathan, pela alegria e inspiração nesta trajetória.

Aos meus irmãos, Ricardo, Edenice, Edna, Edilma e Edilza, pelas orações, incentivo e apoio constantes ao longo da elaboração deste trabalho.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Concluir esta tese representa a realização de um grande esforço pessoal, construído ao longo de dias intensos, entre jornadas de trabalho, compromissos e os desafios de manter o foco nos estudos. Não foi fácil conciliar todas as responsabilidades, mas cada obstáculo superado fortaleceu minha determinação e tornou esta conquista ainda mais significativa. Este trabalho não é fruto de um percurso solitário — ele carrega o apoio, a compreensão e o incentivo de pessoas queridas que, mesmo nos momentos mais difíceis, estiveram ao meu lado com palavras de encorajamento, paciência e fé no meu potencial. A todos vocês, minha mais profunda gratidão por fazerem parte dessa caminhada.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter guiado meus passos com sabedoria e por me conceder força, serenidade e coragem para concluir esta etapa com êxito.

À minha família, especialmente aos meus pais, José Lopes e Eunice Araújo, e aos meus irmãos Edenice, Ricardo, Edna, Edilma e Edilza, meu eterno reconhecimento. Vocês sempre foram meu alicerce, oferecendo amor, apoio incondicional e confiança, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sou grato por cada gesto, cada palavra de incentivo e por acreditarem em mim, mesmo quando tudo parecia distante.

Aos meus filhos Samuel, Ester, Luana e Laíse, meu carinho e agradecimento por serem minha maior fonte de inspiração. O amor, o companheirismo e a presença de vocês me deram forças para seguir em frente com coragem e perseverança, mesmo diante das maiores dificuldades.

À minha querida esposa, Luciene Barbosa, minha eterna gratidão por seu amor inabalável, pela amizade sincera, paciência e incentivo contínuo. Sua presença firme e acolhedora foi meu refúgio nos momentos mais difíceis. Obrigado por estar ao meu lado com fé, carinho e compreensão em cada etapa desta jornada.

À professora Dra. Vera Solange e ao professor Dr. Aluísio Freire, expresso minha sincera gratidão pela orientação atenciosa e dedicada ao longo desta caminhada. A paciência em esclarecer minhas dúvidas, o incentivo constante e a confiança que depositaram em mim foram fundamentais para a realização deste trabalho. Em especial, à professora Vera Solange, minha orientadora, cuja dedicação, paciência e profundo conhecimento foram fonte constante de aprendizado e inspiração em cada etapa do processo. Agradeço por cada observação, conselho, incentivo e até mesmo pelas

“broncas”, sempre acompanhadas de cuidado e com o propósito de promover meu crescimento acadêmico. Mesmo já aposentada, continua exercendo com excelência sua missão de ensinar, deixando em mim o exemplo de compromisso, sabedoria e amor pela educação. Ao professor Aluísio Freire, agradeço pelas valiosas contribuições que enriqueceram significativamente este estudo, pela generosidade em compartilhar conhecimentos e pelo incentivo constante, fundamentais para o amadurecimento intelectual e científico desta pesquisa.

Ao professor Dr. Wilton Pereira da Silva, registro minha profunda gratidão pelas valiosas contribuições, pelas leituras atentas, observações construtivas e pelo constante apoio ao longo desta jornada acadêmica. Agradeço também pela generosa disponibilização gratuita de seus *softwares* e pela liberação do laboratório, ações fundamentais que facilitaram significativamente a realização desta pesquisa. Sua orientação tornou este trabalho mais sólido e consistente, e sua consideração ao me chamar de “fruto dos frutos” representa uma honra que levarei comigo em minha trajetória.

Ao professor Dr. Jair Stefanini, amigo desde os tempos do SENAI, expresso minha mais profunda gratidão pelo tempo dedicado à leitura e pelas valiosas sugestões que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho. Agradeço, em especial, pelo abraço sincero e pelas palavras dirigidas ao meu ouvido ao final da defesa de Seminários I, quando afirmou que eu era uma referência para minha família, mensagem que me emocionou e fortaleceu profundamente. Sou imensamente grato por sua confiança, amizade e por acreditar em minha capacidade de concluir esta jornada.

À professora Dra. Célia Maria, registro minha sincera gratidão pela dedicação e pelas valiosas contribuições por meio de suas leituras atentas e sugestões construtivas desde as apresentações iniciais. Agradeço também pelas “broncas”, que me impulsionaram a buscar o melhor de mim em cada etapa. Seu cuidado, disponibilidade e interesse em colaborar foram fundamentais para o aperfeiçoamento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

À Professora Dra. Leidjane Matos de Souto, por gentilmente aceitar o convite para integrar a banca examinadora desta tese, agradeço pela disponibilidade, atenção e rigor dedicados à leitura criteriosa deste trabalho, bem como pelas valiosas considerações, sugestões pertinentes e críticas construtivas, que contribuíram significativamente para o seu aprimoramento. Sua participação foi essencial para o

fortalecimento da qualidade científica desta pesquisa, tornando-a mais consistente e relevante.

À professora Dra. Vanessa e a toda equipe técnica dos laboratórios de Bromatologia (LABROM) e de Tecnologia de Alimentos (LTA) do Centro de Educação e Saúde da UFCG (Campus Cuité), expresso meus mais sinceros agradecimentos pelo apoio, competência e dedicação, fundamentais para a realização das análises físico-químicas e dos experimentos que subsidiaram o desenvolvimento desta tese. À professora Dra. Vanessa, registro ainda minha especial gratidão não apenas pela contribuição direta na condução das análises, mas também pelo aceite em participar da banca examinadora, bem como pelas considerações e sugestões apresentadas durante a avaliação, as quais contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

À Maria Brígida e à equipe do Laboratório de Análise de Alimentos (LANALI) do Centro Universitário UNIESP (Cabedelo), agradeço pelo empenho, profissionalismo e acolhimento demonstrados durante a realização deste estudo. Responsáveis pelas análises microbiológicas, conduziram os procedimentos com rigor técnico, ética e comprometimento, assegurando a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos, fundamentais para a validação dos dados e para a adequada fundamentação das conclusões desta tese.

Ao Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, minha gratidão pela formação de excelência e pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação, professor Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima, agradeço pelo apoio contínuo, pela disponibilidade e pela atenção dispensada ao longo de toda a minha trajetória no curso.

Aos professores e funcionários da Pós-Graduação, em especial à Dona Fátima, secretária do curso, meu reconhecimento pela dedicação, pela transmissão de conhecimento e pela assistência, essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico.

Aos colegas de doutorado, muito obrigado pela convivência enriquecedora, pelas trocas de experiências e pelas amizades construídas. Em especial, às professoras Patrícia e Rosângela Silveira, minha gratidão pela amizade sincera e pelas contribuições generosas que marcaram profundamente meu percurso acadêmico e pessoal.

Aos amigos e irmãos em Cristo, Júlia Tavares e Mailton, expresso minha sincera gratidão pelas constantes orações, pelo apoio espiritual e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Suas palavras de encorajamento, fé e amizade trouxeram força, esperança e renovação ao longo desta caminhada. Que Deus continue abençoando abundantemente suas vidas.

Aos integrantes da Polícia Militar da Paraíba, em especial ao 3º Esquadrão de Polícia Montada (3º EPMont), registra-se o sincero agradecimento pelo apoio e incentivo ao longo desta trajetória acadêmica e profissional. Aos comandantes que já passaram pela unidade, Tenente-Coronel Mônica e Tenente-Coronel Edmilson, bem como aos atuais comandantes, Capitão Honório e Capitã Mércia, expressa-se o reconhecimento pelo compromisso, liderança e incentivo às atividades desenvolvidas. Aos amigos praças, que estiveram presentes nos momentos de dificuldade, registra-se a gratidão pelo apoio, companheirismo e auxílio indispensáveis ao longo do percurso.

Aos colegas de trabalho e irmãos de farda, registra-se a eterna gratidão pelo apoio, companheirismo e incentivo constantes, que foram fundamentais em diferentes etapas desta caminhada: ao Subtenente Carvalho, ao SGT Emerson, ao SGT Lázaro, ao Magalhães, ao SGT César, ao SGT Ribeiro, ao SGT Enderson, ao SGT Franklin, ao CB Rannedyson, ao SGT Maciel, ao SGT Vieira, ao SGT De Lima, à CB Emanuella, à SGT Hayllandia, ao SGT Siderlan, ao SGT Chagas, ao SGT Egito e ao SGT P. Sérgio, bem como aos irmãos de farda e companheiros de guarnição da Rádio Patrulha, CB Nilson e CB Mateus, e a todos os integrantes do Policiamento Montado (EPMont), pela parceria, apoio e incentivo fundamentais ao longo desta jornada.

Aos amigos do curso de Matemática, registra-se um agradecimento especial a Marinaldo, Josinaldo e Boaz, bem como à Professora Alexsandra e ao Professor Salomão, além dos amigos pibidianos do IFPB, pelo companheirismo, incentivo e partilha de experiências ao longo da construção deste trabalho, contribuindo de forma significativa para esta trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço às agências de fomento CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa científica no país. O suporte dessas instituições foi fundamental para a viabilidade desta pesquisa e para a continuidade do meu percurso acadêmico.

EPÍGRAFE

“Assim como a energia nunca se perde, apenas se transforma, o conhecimento verdadeiro também não desaparece — ele se desloca, se converte e se perpetua em cada mente que o compreende.”

— Inspirado nos princípios da conservação da energia.

Autoria própria

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS XVI

NOMECLATURAS XXV

Letras Gregas XXVI

RESUMO XXVIII

1 CAPÍTULO: INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivo geral 4

1.2 Objetivos específicos 5

2 CAPÍTULO: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 6

2.1 Aspectos gerais da alimentação 6

2.2 Noções de Microbiologia dos alimentos 9

2.3 Conservação e armazenamento de alimentos 11

2.4 Pasteurização 15

2.4.1 Tipos de pasteurização 16

2.4.2 Pasteurização por Banho Maria. 17

2.5 Trabalhos que utilizaram calor como método de conservação 18

2.6 Frutas tropicais 26

2.6.1 Fruta Pesquisada: Graviola 27

2.7 Fenômeno de transporte 31

2.7.1 Termologia. 31

2.7.2 Calor específico 32

2.8 Transferência de Calor 32

2.8.1 Condução 33

2.8.2 Convecção 34

2.8.3 Radiação 35

2.9 Equação de Transporte 35

2.10 Equação da condução do calor 36

2.11 Equação de difusão 40

2.12 Condições de contorno para solução da equação de difusão 45

2.13 A geometria do Cilindro finito 46

2.14 Equação de difusão em coordenadas cilíndricas 47
2.15 Ferramentas para solução da equação de difusão 51
2.16 Ferramentas analíticas 51
2.16.1 Soluções analíticas 51
2.17 Solução analítica da equação de difusão para um cilindro finito 52
2.17.1 Soluções Numéricas 55
2.18 Formulações para os métodos numéricos 57
2.19 Métodos numéricos na solução de problemas difusivo. 60
2.20 Trabalhos que utilizam com soluções numéricas para a Equação de difusão 62
3 CAPÍTULO: MATERIAIS E MÉTODOS 67
3.1 Ferramentas numéricas 67
3.1.1 Cilindro finito: solução numérica da equação de difusão 67
3.1.2 Hipóteses para a obtenção da solução numérica para o cilindro finito 68
3.1.3 Solução numérica da equação de difusão: geometria cilíndrica 68
3.1.4 Discretização da equação de difusão para os volumes de controle internos 73
3.1.5 Discretização da equação de difusão para o volume de controle sudeste 76
3.1.6 Simetria radial e o volume de controle no contorno noroeste 77
3.1.7 Simetria axial 79
3.1.8 Avaliação do coeficiente de transporte Γ^{Φ} nas interfaces 82
3.2 Métodos de resolução de sistemas lineares 84
3.2.1 Método numérico de Gauss-Seidel 84
3.2.2 Solução Numérica para a Condição de contorno do Primeiro Tipo 85
3.3 Software desenvolvido para o cilindro finito 86
3.4 Metodologia experimental 86
3.4.1 A matéria prima utilizada 87
3.4.2 Preparações das amostras 88
3.4.3 Fabricação do recipiente 91
3.4.4 A aquisição dos dados de temperatura 96
3.5 Banho maria Kacil 98
3.6 Procedimentos experimentais 100
3.7 Metodologia da análise e resultados das análises físico-químicas e microbiológico 106
3.8 Determinação de compostos de fenólicos totais e atividade antioxidante total 107

3.8.1 Elaboração do extrato 107
3.8.2 Compostos Fenólicos Totais 108
3.8.3 Atividade Antioxidante Total 108
3.9 Análise microbiológica 109
3.9.1 Contagem de Bactérias totais 109
4 CAPÍTULO: RESULTADOS E DISCUSSÃO 111
4.1 Considerações preliminares 111
4.2 Análise da penetração do calor: resultados experimentais com condição de contorno Dirichlet 111
4.2.1 Transferência de calor para a polpa da Graviola 111
4.2.2 Dados experimentais das pasteurizações 112
4.3 Cinética de calor no centro e na borda do recipiente a partir de dados experimentais 113
4.4 Média das Pasteurizações 120
4.5 Soluções numéricas: interface gráfica dos softwares e validações das soluções numéricas. 123
4.5.1 Estudo da malha 123
4.5.2 Interface Gráfica 125
4.5.3 Menu “Arquivo” 126
4.5.4 Item “Otimização” 126
4.5.5 Item “Simulação” 132
4.6 Resultados e análises das otimizações para condição de contorno de Dirichlet constante 135
4.6.1 Estudo das expressões da difusividade térmica em função da temperatura no centro da amostra, considerando condição de contorno constante. 138
4.6.2 Otimização para amostra GR1 138
4.6.3 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor 140
4.6.4 Otimização para amostra GR2 142
4.6.5 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor 144
4.6.6 Otimização Para amostra GR3 146
4.6.7 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor. 149
4.6.8 Otimização Para amostra GR4. 151
4.6.9 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor. 152

4.6.10 Otimização para a amostra GR5. 154
4.6.11 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor. 156
4.6.12 Otimização para amostra GR6. 158
4.6.13 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor 159
4.7 Média das pasteurizações (GRM). 161
4.7.1 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor contorno constante. 165
4.7.2 Simulação da distribuição de calor com condição de contorno constante . 167
4.8 Difusividade térmica variável com condição de contorno do primeiro tipo variável. 169
4.8.1 Determinação das expressões para a temperatura de contorno variável de primeiro tipo. 175
4.8.2 Expressão para difusividade térmica considerando contorno do primeiro tipo variável. 175
4.8.3 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor 186
4.8.4 Análise da Simulação de Penetração de Calor em Polpa de Graviola sob Tratamento Térmico. 189
4.8.5 Simulação distribuição de calor com contorno variável de primeiro tipo. . 190
4.9 Efeito da pasteurização sobre a composição físico-química 197
4.10 A equação de Riedel. 200
4.11 Discussão dos resultados obtidos nas otimizações 203
5 CAPÍTULO: CONCLUSÕES 213
5.1 Considerações iniciais 213
5.2 Conclusões 213
5.3 Sugestões para trabalhos futuros 214
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 215
APÊNDICE A 236
APÊNDICE B 247

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 : Graviola (*Annona Muricata L.*). 28
Figura 2.2 : Volume de controle de forma arbitrária. 37
Figura 2.3 : Fluxo de calor em um volume elementar em coordenadas cartesianas. 37
Figura 2.4 : (a) Interseção de uma placa infinita e um cilindro infinito; (b) Cilindro finito de raio R e comprimento L. 47
Figura 2.5 : Sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas. 48
Figura 2.6 : Cilindro finito. 53
Figura 2.7 : Métodos para solução de problemas da equação de difusão. 56
Figura 2.8 : Função de interpolação no tempo. 58
Figura 2.9 : Formulação explícita. 59
Figura 2.10 : Formulação Implícita. 59
Figura 2.11 : Formulação totalmente implícita. 60
Figura 3.1 : (a) Cilindro finito e uma fatia simétrica; (b) Fatia simétrica do cilindro definida pelo ângulo $\Delta\theta$; (c) Retângulo onde serão definidos os volumes de controle. Retângulo obtido com as hipóteses de simetria. 69
Figura 3.2 : (a) Malha bidimensional para a solução numérica da equação de difusão no cilindro; (b) destaque de um elemento de malha. 70
Figura 3.3 : Volume de controle para geometria cilíndrica. 71
Figura 3.4 : Tipos de volumes de controle da malha bidimensional. 71
Figura 3.5 : Volume de controle interno de ponto nodal P e os volumes de controle vizinhos ao leste (L), ao norte (N) ao sul (S) e a oeste (W). 74
Figura 3.6 : Volume de controle de ponto nodal P no contorno sudeste. 76
Figura 3.7 : Volume de controle de ponto nodal P no contorno noroeste. 78
Figura 3.8 : Simetria axial: (a) retângulo inteiro; (b) metades simétricas do retângulo; (c) detalhe da malha geratriz. 80
Figura 3.9 : Volume de controle de ponto nodal P no contorno sudoeste 81
Figura 3.10 : Coeficiente de transporte: (A) nos pontos nodais P e E, respectivamente. (B) na interface do volume de controle. 83
Figura 3.11 : Matéria prima utilizada “Graviola”. 88
Figura 3.12 : Assepsia da graviola utilizada no experimento 89
Figura 3.13 : Liquidificador Phillips Walita 1400W. 89

Figura 3.14 : Acondicionamento da polpa da graviola. 90
Figura 3.15 : Fluxograma preparo da polpa. 90
Figura 3.16 : Medida interna largura. 92
Figura 3.17 : Recipiente cilíndrico de vidro. 93
Figura 3.18 : Recipiente cilíndrico de vidro. 94
Figura 3.19 : Paquímetro digital em aço inoxidável, 150 mm. 95
Figura 3.20 : Medidas internas: (a) profundidade e (b) diâmetro interno. 96
Figura 3.21 : (a) Termômetro digital portátil TH-095; (b) cabo RS-232; e (c) termopar tipo K. 96
Figura 3.22 : Banho-maria digital Kacil, modelo BM-02. 99
Figura 3.23 : Cubas cilíndricas de vidro conectadas aos termopares. 100
Figura 3.24 : Recipiente contendo a polpa acondicionada. 101
Figura 3.25 : Preparação do recipiente utilizado no experimento. 101
Figura 3.26 : Silicone Poly Fort utilizado na vedação dos recipientes experimentais. 102
Figura 3.27 : Termômetro digital portátil modelo TH-095 utilizado no experimento. 103
Figura 3.28 : Configuração do experimento realizado. 104
Figura 3.29 : Monitoramento térmico da água durante o experimento. 105
Figura 3.30 : Caixa de isopor utilizada para resfriamento 106
Figura 4.1 : Pontos experimentais da temperatura para a amostra GR1 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro). 114
Figura 4.2 : Pontos experimentais da temperatura para a amostra GR2 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro). 115
Figura 4.3 : Representação GR3 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro) 116
Figura 4.4 : Representação GR4 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro). 117
Figura 4.5 : Representação GR5 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro). 118
Figura 4.6 : Representação GR6 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro). 119
Figura 4.7 : Média dos 6 experimentos (no contorno). 121
Figura 4.8 : Média dos 6 experimentos (no centro). 122
Figura 4.9 : (a) Malha no domínio físico destacando o ponto nodal e suas fronteiras. (b)Representação da malha no domínio computacional. 124
Figura 4.10 : Tela principal do *software* Numerical Heat Transfer desenvolvido para otimizar a transferência de calor com condição de contorno do primeiro tipo. 125
Figura 4.11 : Menu “Arquivo”. 126

Figura 4.12 : Caixa de diálogo para que sejam inseridos os dados gerais. 127
Figura 4.13 : Caixa de diálogo para expressão de contorno constante. 127
Figura 4.14 : Caixa de diálogo para que seja escolhida uma expressão para a difusividade. 128
Figura 4.15 : Dados iniciais para condições de contorno constante. 128
Figura 4.16 : Tela do *software* ao iniciar o processo de otimização. 129
Figura 4.17 : Resultados otimizados. 130
Figura 4.18 : Opções de visualização de gráfico. 130
Figura 4.19 : Arquivo "otimo.txt" expressão para a difusividade e parâmetros ótimos131
Figura 4.20 : Gráfico gerado pela simulação comparado com os dados experimentais.132
Figura 4.21 : Expressões (ou valores fixos) para o raio, o comprimento e a difusividade térmica, além dos valores correspondentes ao termo fonte. 133
Figura 4.22 : Informados os dados gerais para a simulação. 133
Figura 4.23 : Gerar arquivos de dados da simulação 134
Figura 4.24 : Instantes para distribuição da temperatura nos planos escolhidos 134
Figura 4.25 : Imagem dos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm)..... 137
Figura 4.26 : Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F6 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente. 140
Figura 4.27 : Contornos das isotérmicas da função $F6 = \alpha(T)\ \text{constante}$ nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 07 segundos. 141
Figura 4.28 : Contornos das isotérmicas $F6 = \alpha(T)\ \text{constante}$ nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 05 segundos. 142
Figura 4.29 : Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F2 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente. 144
Figura 4.30 : Contornos das isotérmicas da Função $F2 = \alpha(T)\ \text{constante}$ nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 07 segundos. 145

Figura 4.31 : Contornos das isotérmicas da Função F2 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 03 segundos. 146
Figura 4.32 : Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F6 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente. 148
Figura 4.33 : Contornos das isotérmicas da Função F6 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 12 segundos. 149
Figura 4.34 : Contornos das isotérmicas da Função F6 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola nos instantes de tempo: 22 minutos e 02 segundos. 150
Figura 4.35 : Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F4 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente. 152
Figura 4.36 : Contornos das isotérmicas da Função F4 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 02 segundos. 153
Figura 4.37 : Contornos das isotérmicas da Função F4 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola nos instantes de tempo: 22 minutos e 09 segundos. 154
Figura 4.38 : Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F2 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente. 155
Figura 4.39 : Contornos das isotérmicas da Função F2 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 08 segundos. 156

Figura 4.40 : Contornos das isotérmicas da Função F2 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 03 segundos. 157
Figura 4.41 : Representação gráfica da penetração de calor a partir da simulação numérica via funções (a) F5 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente. 159
Figura 4.42 : Contornos das isotérmicas da Função F5 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 13 segundos. 160
Figura 4.43 : Contornos das isotérmicas da Função F5 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 02 segundos. 161
Figura 4.44 : Gráfico mostrando as três melhores funções para a difusividade térmica da polpa de graviola (amostra GRM). 163
Figura 4.45 : Função difusividade média da polpa de graviola.Figura 4.45: Função difusividade média da polpa de graviola. 164
Figura 4.46 : Cinética de aquecimento no centro obtido pela simulação das funções (a) F4 e (b) F1. A cinética de aquecimento dos dados médios é mostrado nos dois gráficos (pontos pretos). 165
Figura 4.47 : Cinética de aquecimento obtido pela simulação da função media constante nos planos (y = 6 mm e 12 mm), nos instantes de tempos de (a) 3minuto e 05 segundos (b) 12 minutos e 02 segundos e (c) 22 minutos. 166
Figura 4.48 : Contornos das isotérmicas da Função F4 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 10 minutos e 07 segundos. 167
Figura 4.49 : Contornos das isotérmicas F4 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 25 minutos e 05 segundos. 168
Figura 4.50 : Caixa de diálogo preenchimento das informações gerais. 170

Figura 4.51 : Caixa de diálogo para expressões de contorno variável. 171
Figura 4.52 : Caixa de diálogo para que seja escolhida uma expressão para a difusividade 171
Figura 4.53 : Dados iniciais para condições de contorno variável. 172
Figura 4.54 : Dados iniciais para condições de contorno variável. 172
Figura 4.55 : Resultados parciais da otimização. 173
Figura 4.56 : Arquivo “ótimo.txt” expressão para difusividade e dados da otimização. 174
Figura 4.57 : Simulação do processo. 175
Figura 4.58 : Identificação das fases. 176
Figura 4.59 : Ajuste primeira fase (contorno). 177
Figura 4.60 : Ajuste segunda fase (contorno). 178
Figura 4.61 : Ajuste terceira fase (contorno). 179
Figura 4.62 : Evolução da temperatura no contorno considerando a condição de contorno de primeiro tipo variável: resultados experimentais (preto) e a função ajustada (vermelho). 180
Figura 4.63 : Comparativo das cinéticas no contorno e no centro. 181
Figura 4.64 : Cinética de aquecimento obtido no centro da amostra pela simulação das funções (a) F4 (difusividade variável) e (b) F1(difusividade constante), considerando a contorno variável primeiro tipo. A cinética de aquecimento dos dados médios e mostrado nos dois gráficos (curva preta). 183
Figura 4.65 : Comparação da temperatura T em função do tempo t, no contorno e no centro os pontos pretos representam os dados experimentais, enquanto as curvas vermelhas correspondem ao ajuste do modelo utilizando condição de contorno variável de primeiro tipo (Dirichlet). 184
Figura 4.66 : Comparativo cinética de aquecimento da função difusividade F4 contorno variável (lilás) e contorno constante (vermelho). 185
Figura 4.67 : Mostra as curvas isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 6mm e 12 mm) nos instantes de tempos de (a) 3 minutos 04 segundos (b) 12 minutos e 02 segundos e (b) 22 minutos. 186
Figura 4.68 : Mostra as curvas isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 15 mm e 20 mm) nos instantes de tempos de (a) 12 minutos 02 segundos (b) 18 minutos e 02 segundos e (b) 24 minutos e 03 segundos. 187

Figura 4.69 : Mostra as curvas isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 12 mm e 20 mm) nos instantes de tempos de (a) 3 minutos 04 segundos (b) 12 minutos e 02 segundos e (b) 22 minutos. 188
Figura 4.70 : Modelo de Simulação da Penetração de Calor em Geometria Cilíndrica.190
Figura 4.71 : Contornos das isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 10 minutos e 06 segundos. 192
Figura 4.72 : Contornos das isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 20 minutos e 06 segundos. 193
Figura 4.73 : Comparação da distribuição de temperatura no interior do cilindro, obtida por simulação da transferência de calor, no instante de 10 minutos e 07 segundos de processo: (a) condição de contorno variável e (b) condição de contorno constante. 194
Figura 4.74 : Comparação da distribuição de temperatura no interior do cilindro, obtida por simulação da transferência de calor, no instante de 20 minutos e 05 segundos de processo: (a) condição de contorno variável e (b) condição de contorno constante. 195
Figura 4.75 : Comparação da distribuição de temperatura no interior do cilindro, obtida por simulação da transferência de calor, no instante de 25 minutos e 05 segundos de processo: (a) condição de contorno variável e (b) condição de contorno constante. 196
Figura 4.76 : Placas de Petrifilm AC Contagem de Aeróbios positivas para bactérias totais amostr*a in natura.* 200
Figura 4.77 : Placas de Petrifilm AC Contagem de Aeróbios negativas para bactérias totais amostra tratado termicamente. 200
Figura A.1 : Volume ao norte com vizinhos a oeste, a leste e ao sul. 237
Figura A.2 : Volume ao sul e seus vizinhos ao norte, a oeste e a leste. 239
Figura A.3 : Volume de controle leste e seus vizinhos ao norte, ao sul e a oeste. 241
Figura A.4 : Volume de controle a oeste e seus vizinhos ao norte, ao sul e a leste. ... 243
Figura A.5 : Volume de controle nordeste com seus volumes de controle vizinhos a oeste e ao sul. 245

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 : Tempos e temperaturas de pasteurização. 17
Tabela 2.2 : Composição nutricional média da Graviola, *in natura*. 29
Tabela 2.3 : Alguns parâmetros da Graviola. 30
Tabela 3.1 : Instrumentos e acessórios para medição de temperatura. 97
Tabela 4.1 : Pasteurizações realizadas na pesquisa e respectivos valores de temperatura e número de pontos selecionados. 113
Tabela 4.2 : Expressões testadas para a difusividade em função da temperatura local. 137
Tabela 4.3 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR1, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2) 139
Tabela 4.4 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR2, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2). 143
Tabela 4.5 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR3, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2). 147
Tabela 4.6 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR4, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2). 151
Tabela 4.7 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR5, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2) 155
Tabela 4.8 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR6, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2). 158
Tabela 4.9 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente com valores médios das pasteurizações, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2). 162
Tabela 4.10 : Valores de a e b das funções da difusividade térmica para condição de contorno variável Função F4 e F1, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2). 182

Tabela 4.11 : Relação dos instantes de tempo em minutos e segundos. 191
Tabela 4.12 : Composição centesimal das polpas de graviola. 197
Tabela 4.13 : Teor de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante total das polpas de graviola. 198
Tabela 4.14 : Contagem padrão em placas de polpa de graviola in natura e submetida à pasteurização 199
Tabela 4.15 : Difusividade térmica de algumas frutas. 212
Tabela B.1 : GR1 sensor 1, dados no contorno da amostra. 248
Tabela B.2 : GR1 Sensor 2, dados no centro da amostra. 249
Tabela B.3 : GR2 sensor 2, dados centro da amostra. 251
Tabela B.4 : GR3 sensor 1, dados contorno da amostra. 252
Tabela B.5 : GR3 sensor 2, dados centro da amostra. 253
Tabela B.6 : GR4 sensor 2, dados no centro da amostra. 255
Tabela B.7 : GR5 sensor 1, dados no contorno da amostra. 256
Tabela B.8 : GR5 sensor 2, dados no centro da amostra. 257
Tabela B.9 : GR6 sensor 1, dados contorno da amostra. 258
Tabela B.10 : GR6 sensor 2, dados no centro da amostra. 259
Tabela B.11 : GRM Temperatura média experimental no contorno da amostra de graviola durante a pasteurização. 260
Tabela B.12 : GRM Temperatura média experimental no centro da amostra de graviola durante a pasteurização. 261

NOMECLATURAS

Letras latinas

A_p, A_w, A_e, A_n, A_s – Coeficientes da equação de difusão discretizada $[-]$

A_n, A_m – Coeficientes da solução analítica dependente da posição $[-]$

B – Termo independente de Φ na equação de difusão discretizada $[-]$

c_P – Calor especifico a pressão constante $\left[Jkg^{-1}K^{-1}\right]$

E, W, N, S, P – Pontos nodais $[-]$

f – Fator de partição $[-]$

J_0, J_1 – Funções de Bessel de 1ª espécie de ordem zero e de ordem um $[-]$

k – Condutividade térmica $\left[Wm^{-1}K^{-1}\right]$

L – Comprimento do cilindro $[m]$

N_p – Número de pontos experimentais $[-]$

nc_p – Número de dados calculados $[-]$

np_p – Número de partição $[-]$

r – Posição radial, coordenada cilíndrica $[m]$

R – Raio do cilindro $[m]$

R^2 – Coeficiente de determinação $[-]$

r_p – Posição radial do ponto nodal $"p"$ $[m]$

r_e – Posição radial da fronteira $"e"$ $[m]$

r_w – Posição radial da fronteira $"w"$ $[m]$

Δr – Largura de um volume de controle $[m]$

S_c – Componente constante do termo fonte linear em Φ $[-]$

S_p – Componente do termo fonte linearizado $[-]$

S^{Φ} – Termo fonte da equação de transporte $[-]$

t – Tempo decorrido desde o início do processo $[s]$

t_i – Tempo referente ao i-ésimo ponto experimental $[s]$

t_i^{sim} – Tempo referente ao i-ésimo ponto de simulado $[s]$

T – Temperatura $\left[{}^0C\right]$

$\vec{v}$ – Grandeza vetorial que representa a velocidade do meio $\left[ms^{-1}\right]$

Letras Gregas

α – Difusividade térmica $\left[m^2s^{-1}\right]$

μ_n, μ_m – Raízes da equação característica $[-]$

Φ – Variável dependente no fenômeno de transporte $[-]$

Φ_i – Variável dependente de transporte do i-ésimo volume de controle $[-]$

Φ_i^{sim} – Valor simulado de Φ correspondente ao i-ésimo ponto experimental $[-]$

Φ^{sim} – Valor simulado de Φ $[-]$

$\Phi_P, \Phi_E, \Phi_W, \Phi_N$ e Φ_S – Variáveis dependentes em equações discretizadas $[-]$

Φ_e, Φ_w, Φ_n e Φ_s – Variáveis de transporte nos contornos leste, oeste, norte e sul $[-]$

λ – Coeficiente de transporte $[-]$

Γ^{Φ} – Coeficiente de transporte $[-]$

Γ_e^{Φ} – Coeficiente de transporte na interface entre "P" e "E" $[-]$

Γ_w^{Φ} – Coeficiente de transporte na interface entre "P" e "W" $[-]$

Γ_n^{Φ} – Coeficiente de transporte na interface entre "P" e "N" $[-]$

Γ_s^{Φ} – Coeficiente de transporte na interface entre "P" e "S" $[-]$

Γ_E^{Φ} – Coeficiente de transporte no ponto nodal "E" $[-]$

Γ_P^{Φ} – Coeficiente de transporte no ponto nodal "P" $[-]$

Γ_W^{Φ} – Coeficiente de transporte no ponto nodal "W" $[-]$

Γ_N^{Φ} – Coeficiente de transporte no ponto nodal "N" $[-]$

Γ_S^{Φ} – Coeficiente de transporte no ponto nodal "S" $[-]$

ρ – Densidade (massa específica) $\left[Kgm^{-3}\right]$

$\frac{1}{\sigma_i^2}$ – Peso estatístico do i-ésimo ponto experimental [–]

χ^2 – Qui-quadrado [–]

∇ – Gradiente [–]

$\nabla.$ – Divergente [–]

Δ – Variação [–]

Sobrescrito

0 – Tempo anterior

e, w, n e s – Fronteiras leste, oeste, norte e sul de um volume de controle

E, W, N e S – Ponto nodal leste, oeste, norte e sul de um volume de controle

P – Nó do volume de controle em estudo

RESUMO

O presente estudo abordou a solução numérica da equação de difusão em coordenadas cilíndricas bidimensionais, considerando condição de contorno de Dirichlet variável aplicada à pasteurização da polpa de graviola, com o objetivo de descrever o processo de transferência de calor durante o tratamento térmico do produto. Foi desenvolvido um modelo matemático baseado na equação governante da difusão térmica, cuja solução numérica foi implementada por meio de um código computacional capaz de simular o comportamento transiente da temperatura e estimar propriedades termofísicas dependentes da temperatura local. A equação de difusão, escrita em coordenadas cilíndricas bidimensionais, foi discretizada e resolvida numericamente, via método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita e para condição de contorno de primeiro tipo variável. Para a parte experimental, foi utilizado um recipiente de vidro com geometria cilíndrica, no qual foram fixados dois termopares, sendo um na superfície interna (borda interna) e outro no centro. Seis pasteurizações foram realizadas e os valores de temperatura e tempo (a cada segundo) foram armazenados em arquivos de extensão txt através do *Software* Data Logger. Foram analisados dois modelos matemáticos: difusividade térmica variável e temperatura de contorno constante e difusividade térmica variável e temperatura de contorno variável. Por meio do processo de otimização, verificou-se que a função que melhor representou a dependência da difusividade térmica com a temperatura foi $\alpha(T) = 1{,}455 \times 10^{-7}\cosh(7{,}9774 \times 10^{-3}\ T)\ m^2s^{-1}$, apresentando os melhores indicadores estatísticos de ajuste (χ^2 e R^2). Para a função constante, o valor encontrado foi igual a $\alpha(T) = 1{,}218 \times 10^{-7}\ m^2s^{-1}$. Ambos apresentaram bons indicadores estatísticos. Entretanto, o modelo com condição de contorno variável apresentou maior representatividade física devido à influência térmica do recipiente de vidro durante a pasteurização. A média das difusividades térmicas obtidas apresentou concordância com a equação de Riedel, com discrepância de apenas 0,43%, confirmando a confiabilidade da metodologia proposta. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância com dados disponíveis na literatura, validando a abordagem computacional aplicada à simulação de processos de pasteurização. Foram feitas análises físico-químicas e microbiológica da polpa da graviola, antes e depois da pasteurização com a finalidade de verificar a eficácia da pasteurização para recipientes com geometrias cilíndricas. Os resultados mostram que ocorreu uma redução dos micro-organismos totais, sem alteração nutricional considerável do produto.

Palavras-chave: difusividade térmica; pasteurização; geometria cilíndrica; transferência de calor; volumes finitos; simulação numérica.

ABSTRACT

The present study addressed the numerical solution of the diffusion equation in two-dimensional cylindrical coordinates, considering a variable Dirichlet boundary condition applied to the pasteurization of soursop pulp, with the objective of describing the heat transfer process during the thermal treatment of the product. A mathematical model based on the governing thermal diffusion equation was developed, whose numerical solution was implemented through a computational code capable of simulating the transient temperature behavior and estimating thermophysical properties dependent on the local temperature. The diffusion equation, written in two-dimensional cylindrical coordinates, was discretized and numerically solved using the finite volume method, with a fully implicit formulation and a variable first-type boundary condition. For the experimental part, a cylindrical glass container was used, in which two thermocouples were fixed, one at the inner surface (inner edge) and the other at the center. Six pasteurization experiments were carried out, and temperature and time values (recorded every second) were stored in txt extension files using Data Logger *Software*. Two mathematical models were analyzed: variable thermal diffusivity with constant boundary temperature, and variable thermal diffusivity with variable boundary temperature. Through the optimization process, it was verified that the function that best represented the dependence of thermal diffusivity on temperature was $\alpha(T) = 1.455 \times 10^{-7} \cosh(7.9774 \times 10^{-3}\ T)\ m^2s^{-1}$, presenting the best statistical fitting indicators (χ^2 and R^2). For the constant function, the value obtained was $\alpha(T) = 1.218 \times 10^{-7}\ m^2s^{-1}$. Both models presented good statistical indicators. However, the model with variable boundary condition showed greater physical representativeness due to the thermal influence of the glass container during pasteurization. The average thermal diffusivities obtained were in agreement with the Riedel equation, with a discrepancy of only 0.43%, confirming the reliability of the proposed methodology. The numerical results showed good agreement with data available in the literature, validating the computational approach applied to the simulation of pasteurization processes. Physicochemical and microbiological analyses of the soursop pulp were performed before and after pasteurization in order to verify the effectiveness of pasteurization in containers with cylindrical geometries. The results showed a reduction in total microorganisms, without significant nutritional alteration of the product.

Keywords: thermal diffusivity; pasteurization; cylindrical geometry; heat transfer; finite volumes; numerical simulation.

1 CAPÍTULO: INTRODUÇÃO

A crescente busca por alimentos de qualidade, aliada ao desenvolvimento tecnológico, tem impulsionado algumas áreas da indústria alimentícia, tornando-se um desafio e uma necessidade industrial desenvolver novas tecnologias que permitam a conservação de produtos perecíveis por prazos mais longos, sem comprometer a eficiência e a qualidade final do produto (CARVALHO *et al*., 2017; ATAÍDE e SILVA, 2018; SILVA *et al.,* 2018; AIRES *et al*., 2019; CHEMICAL, 2024; GÁSPARO e CASA GRANDE, 2025).

A conservação desses alimentos tem como principal objetivo adotar métodos para inibir ou inativar o crescimento microbiano, garantindo, assim, a segurança alimentar e o aumento da vida útil dos produtos (MENEZES *et al*., 2014; BARBOSA, 2019, JEANETTE, 2021). Dessa forma, faz-se necessário um número maior de pesquisas referentes ao processamento de alimentos, com o objetivo de conhecer melhor suas propriedades físicas.

Dentre as principais técnicas de conservação existentes, destacam-se: processos de conservação pelo frio (resfriamento, congelamento), conservação pelo controle da umidade (secagem), conservação pela adição de sal (salga) ou de açúcar, e conservação pela ação do calor (aquecimento, descongelamento, fritura, pasteurização).

Pasteurização é o termo dado aos processos térmicos suaves que agem na conservação de alimentos, baseando-se em um binômio tempo-temperatura, e que ocorrem a temperaturas inferiores a 100 ºC, aplicados por um determinado intervalo de tempo (BARROS *et al*., 2015; SOBRAL *et al*., 2016; MACHADO, 2019). Esse processo tem a finalidade de inativar ou eliminar micro-organismos patogênicos capazes de deteriorar os alimentos e diminuir sua vida útil (PENG *et al*., 2015). Temperaturas inferiores a 100 ºC provocam alterações mínimas no valor nutritivo dos produtos e em suas características sensoriais (ATAÍDE e SILVA, 2018; CHILANTE *et al.,* 2024).

Durante a pasteurização, o monitoramento da temperatura nas diferentes etapas do processo é extremamente importante para o controle de mecanismos microbiológicos, como, por exemplo, na pasteurização de alimentos, o que intervém diretamente sobre a qualidade e as características do produto final (ATAÍDE e SILVA, 2018; MACHADO, 2019). O objetivo é manter as características nutricionais, que são

um pré-requisito para a segurança alimentar, de modo que o produto não seja nocivo ao consumo humano (MAURYA *et al*., 2025).

As técnicas de pasteurização e esterilização para a inativação de microrganismos e enzimas na indústria de alimentos (MACHADO, 2019; HOANG *et al*, 2022) tendem a crescer devido à demanda por produtos alimentícios à base de frutas, como as polpas de frutas frescas, que são seguras e apresentam melhor qualidade e vida útil prolongada. Entretanto, as novas tecnologias que podem satisfazer os objetivos desse processo térmico têm evoluído rapidamente nos últimos anos (PENG *et al.,* 2015; BARROS *et al*., 2020).

Para garantir a segurança do processo de pasteurização, é necessário ter conhecimentos e cuidados específicos em relação aos valores dos parâmetros termofisicos utilizados na simulação da transferência de calor. É fundamental garantir que todos os pontos do produto alcancem a temperatura mínima de segurança, com o objetivo de inativar os agentes patogênicos. Dessa maneira, a penetração de calor pode ser realizada em pontos estratégicos do produto, permitindo determinar o tempo necessário para que a temperatura de inativação dos microrganismos patogênicos seja atingida. (COSTA, 2015; SILVA *et al*., 2018; MACHADO, 2019).

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte que quantifica a capacidade de um material de conduzir calor. Os métodos experimentais para sua determinação podem ser classificados como diretos e/ou inversos. Nos métodos diretos, o experimento é planejado para obter as propriedades desejadas de forma simples e objetiva, com o conhecimento prévio das condições de contorno e dos parâmetros ou características relevantes. Já no método inverso, a abordagem é mais abrangente, pois busca estimar múltiplos parâmetros a partir de um único experimento.

Em processos termofisicos transitórios, as propriedades são determinadas diretamente como função da temperatura (OLIVEIRA *et al*., 2019). De modo geral, o método inverso é uma técnica eficiente para utilizar dados na estimativa de constantes presentes em modelos matemáticos, auxiliando na representação de fenômenos físicos (FARIAS *et al*. 2018, SILVA JUNIOR *et al*., 2018, SILVA *et al*. 2019).

Outra propriedade fundamental de transporte é a difusividade térmica, que desempenha um papel crucial em problemas de condução de calor durante processos transitórios. Em termos práticos, a difusividade térmica representa a taxa de propagação do calor em um produto e está diretamente relacionada à condutividade

térmica, ao calor específico e à densidade do meio (COSTA, 2015; ATAÍDE e SILVA, 2018).

A descrição do transporte de calor pressupõe a proposição de um modelo matemático que depende da complexidade e/ou geometria do problema proposto. Um modelo amplamente aceito por vários pesquisadores é o modelo de difusão (MARIANI *et al.,* 2009; SILVA *et al.,* 2010; LINS, 2013; ATAÍDE e SILVA, 2018; SILVA *et al*., 2018a; FARIAS *et al*., 2018; MAURYA *et al.,* 2025).

Consequentemente, o modelo matemático adequado para descrever o fenômeno envolve a solução da equação de difusão, que pode ser resolvida por métodos analíticos e/ou numéricos.

Em algumas situações de interesse, onde o modelo de difusão é utilizado para descrever o processo físico, a forma do corpo em estudo pode ser aproximada por uma geometria regular com condições de contorno simples, e os parâmetros termofisicos considerados constantes, o que facilita a obtenção da solução analítica da equação de difusão. No entanto, para superar algumas limitações dos métodos que simplificam as soluções, uma opção é utilizar a solução numérica, que pode fornecer uma aproximação mais precisa do problema físico real, considerando a variação das propriedades termofisicos (FARIAS *et al.,* 2012; FARIAS *et al.,* 2013; ATAÍDE e SILVA, 2018; AIRES, 2019; MACHADO, 2019).

Assim, a consideração da difusividade térmica como uma função da temperatura local do produto é a abordagem mais adequada, sendo possível utilizá-la por meio da solução numérica da equação de difusão. Contudo, poucos estudos disponíveis na literatura adotam essa perspectiva para a resolução do problema, com a maioria dos trabalhos limitando-se a estabelecer correlações entre a difusividade térmica e a temperatura média dos produtos analisados (SILVA, 2018).

Nesse sentido, o presente estudo analisa as implicações da adoção de uma difusividade térmica constante ou variável, em função da temperatura local, no contexto da transferência de calor durante a pasteurização de alimentos, considerando a variabilidade da condição de contorno do primeiro tipo (Dirichlet).

A escolha por considerar a condição de contorno variável, justifica-se pela particularidade de certos produtos serem comercializados em recipientes de vidro, cujo material dificulta o aquecimento uniforme do conteúdo. Isso resulta em uma resposta térmica mais lenta, impedindo a obtenção instantânea da temperatura desejada. Com isso, são propostos modelos nos quais a temperatura do contorno é uma função do

tempo e difusividade térmica varia conforme a temperatura interna do produto, proporcionando uma descrição mais precisa do processo de pasteurização.

O fruto utilizado neste estudo, transformado em polpa e submetido ao processo de pasteurização, foi a graviola (*Annona muricata L*), devido a sua cultura ser de grande importância para o Brasil. A comercialização da graviola no Brasil é impulsionada pela alta demanda para consumo *in natura* e processamento (polpa, sucos, sorvetes, dentre outros), concentrando nas regiões Nordeste e Norte, com o Estado da Bahia como destaque. Agricultores familiares produzem cerca de 40 mil toneladas anualmente, com a cultura crescendo também no Centro-Oeste e Sudeste, movimentando milhões de reais (RODARTE, 2025).

A polpa de graviola é suscetível à deterioração e ao escurecimento, processos catalisados pela enzima polifenol oxidase (PPO), o que compromete suas qualidades sensoriais e nutricionais (DIAS *et al*., 2015). Após um determinado tempo de aquecimento, o produto é resfriado rapidamente, ocasionando um choque térmico, o qual tem como objetivo eliminar micro-organismos mais resistentes ao calor (BARROS *et al*., 2015; MACHADO, 2019). O processo térmico de conservação visa a destruição dos micro-organismos patogênicos e a inativação das enzimas responsáveis pela deterioração dos alimentos (ARAÚJO *et al*., 2016; ANVISA, 2016; CRISTIANINI *et al.*, 2023).

Este estudo pretende contribuir para a determinação da difusividade térmica da polpa de graviola, considerando que, na literatura consultada, são escassos os estudos que utilizam a condição de contorno de primeiro tipo variável no tempo, bem como a difusividade térmica dependente da temperatura específica do produto.

Dada a limitação de trabalhos que apresentem uma abordagem similar à proposta neste estudo, os resultados poderão fornecer informações relevantes para um melhor entendimento da transferência de calor no processo de pasteurização da polpa de graviola, através da simulação computacional. Nesse contexto, apresentam-se, a seguir, os objetivos da pesquisa.

1.1 Objetivo geral

Aplicar solução numérica da equação de difusão para descrever o processo de pasteurização da polpa de graviola, usando coordenadas cilíndricas bidimensionais via condição de contorno de primeiro tipo variável.

As soluções serão utilizadas na descrição de penetração de calor na polpa de graviola, como objetivo de determinar o parâmetro termofisico da difusividade térmica em função da temperatura local, relativo ao produto em análise.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos a serem atingidos neste trabalho são:

- Realizar experimentos para obter a cinética de aquecimento da polpa de graviola, em recipiente de vidro com geometria cilíndrica;
- Usar o *software* LAB Fit para obter quais as funções descrevem no contorno, a variação de temperatura com o tempo;
- Desenvolver um código computacional na linguagem Fortran para a solução numérica do modelo, visando determinar os parâmetros termofisicos a partir dos dados experimentais;
- Acoplar um otimizador, adaptado à solução numérica proposta;
- Desenvolver interface gráfica de comunicação com o usuário na plataforma Windows;
- Testar várias funções para a difusividade térmica e verificar qual é a que melhor descreve o fenômeno físico no produto;
- Simular a distribuição de temperatura e cinética de aquecimento, utilizando-se modelos matemáticos;
- Analisar via simulação, utilizando a função determinada para a difusividade térmica variável, o comportamento do ponto menos favorável;
- Analisar a eficiência do processo térmico de pasteurização antes e após sua aplicação por meio de análises microbiológicas e físico-químicas, determinação de fenólicos totais e atividade antioxidante total..

2 CAPÍTULO: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo principal deste capítulo é apresentar o problema em estudo, descrevendo os aspectos gerais da alimentação, incluindo a obtenção e as formas de conservação dos alimentos. Também são apresentadas as leis básicas que descrevem o fenômeno físico da transferência de calor e da difusividade térmica durante a pasteurização de produtos em formato cilíndrico, bem como avaliar a influência do processo de pasteurização sobre as características físico-químicas e microbiológicas das polpas de frutas.

2.1 Aspectos gerais da alimentação

O decreto-lei Nº 986, DE 21 DE OUTUBRO DE 1969 instituiu normas básicas sobre alimentos, desde a sua obtenção até o seu consumo. No entanto, para os efeitos deste decreto-lei considera-se alimento toda substância ou mistura de substâncias, no estado sólido, líquido, pastoso ou qualquer outra forma adequada, destinadas a fornecer ao organismo humano os elementos normais à sua formação, manutenção e desenvolvimento (BRASIL, 2001).

Todo alimento possui sabor, cor, forma, aroma e textura, e todos esses aspectos devem ser considerados em uma avaliação nutricional (BRASIL, 2008). Esses itens são essenciais para a vida humana, não apenas como uma necessidade básica, mas também como uma fonte de prazer, cultura e bem-estar. Fornecem ao organismo energia e nutrientes indispensáveis para o crescimento, desenvolvimento e manutenção da saúde.

A OMS – Organização Mundial da Saúde (*apud* MELLO, 2012, p. 1) apresenta a qualidade de vida como a percepção do indivíduo sobre sua posição na vida, no contexto de sua cultura e sistema de valores em que vive, e em relação a seus objetivos, expectativas, padrões e conceitos. Trata-se de um conceito amplo, que inclui a saúde física, o estado psicológico, crenças pessoais, relações sociais e suas interações com o ambiente.

Mais da metade da alimentação dos brasileiros é composta por produtos processados, refletindo mudanças nos padrões alimentares nas últimas décadas. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), alimentos processados e ultraprocessados ocupam uma parcela significativa da dieta nacional. Paralelamente, conforme a Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (ABIA, 2025), o mercado alimentício vem apresentando fortes indícios de crescimento, impulsionado pela globalização e pelas mudanças nos hábitos de consumo, que aumentam a variedade de produtos disponíveis e intensificam os desafios relacionados à alimentação, resultando em uma cadeia alimentar cada vez mais longa, complexa e dinâmica.

Em contrapartida, as mudanças no padrão dietético da população, as inovações na área e a discussão sobre a qualidade de vida e da alimentação cresceram fortemente nos últimos anos, devido à alta incidência de problemas de saúde, por ser um campo em constante adequação às necessidades e vontades dos consumidores. A indústria alimentar desempenha um papel bastante importante, que é o de desenvolver tecnologias que garantam a segurança e a qualidade dos alimentos.

Com a constante busca por uma alimentação saudável e qualidade nutricional adequada, surgiu a necessidade de tornar os produtos seguros para o consumo. A área de alimentos, em um processo contínuo de busca por manter o padrão de qualidade de seus produtos, vem desenvolvendo novas metodologias que visam preservar a integridade dos alimentos, com o intuito de não causar danos à saúde da população e garantir que o organismo receba todos os nutrientes fundamentais para que as funções do corpo sejam executadas de forma equilibrada. Nesse contexto, rótulos ou embalagens de produtos têm sido cada vez mais utilizados para alertar a população sobre o teor de ingredientes, aditivos e informações nutricionais, reforçando a segurança e a conscientização sobre o consumo adequado.

Com o crescimento populacional e o avanço tecnológico ligado ao fluxo de informações, o homem busca encontrar meios para aumentar a expectativa de vida. Esse objetivo pode ser alcançado por meio da mudança de hábitos para uma alimentação saudável, possibilitando que o organismo receba todos os nutrientes necessários para o desempenho adequado das funções do corpo humano. Essa mudança envolve o consumo intenso de frutas, vegetais, leguminosas, gorduras saturadas, carboidratos e carne vermelha, além da ingestão moderada de minerais,

como o sódio. A adesão a uma alimentação saudável melhora a qualidade de vida e evita o surgimento de doenças (PALLAZOLA *et al*., 2019).

Nesse contexto, a indústria de alimentos, em busca de melhorias, resultou em novas descobertas, bem como no desenvolvimento de técnicas e meios de conservação que evitam a deterioração rápida dos alimentos. Além disso, as novas embalagens alertam a população sobre o alto teor de alguns produtos prejudiciais à saúde, como sal, açúcares e aditivos. Aires (2019) afirma que, segundo a WHO (World Health Organization), 20% dos alimentos produzidos são perdidos devido à deterioração microbiana. Em face dessa problemática, são cada vez mais adotados métodos de conservação duradouros, capazes de atender à produção e à demanda, com uma perda não tão significativa.

Desta forma, a má conservação dos alimentos pode torná-los inadequados para o consumo humano devido às suas características físicas. Uma das maiores dificuldades das indústrias alimentícias é controlar a perda de produtos devido à deterioração microbiana. Nos últimos anos, têm ocorrido várias mudanças no padrão alimentar do Brasil, com repercussões no processo saúde/doença da população (BERALDO e FERRARI, 2023).

Outro fato importante é que os alimentos são geralmente produzidos em localidades distantes de onde são manufaturados ou vendidos. Durante o transporte, muitos são amassados ou deteriorados, acarretando uma grande perda. Entretanto, esse desperdício começa já na coleta dos alimentos. Tanto na coleta manual quanto na mecânica, muitos alimentos ficam danificados e, dessa forma, são descartados antes de serem vendidos.

A área de alimentos busca a todo momento se atualizar e manter o padrão de qualidade dos seus produtos. Deve-se levar em consideração as características que os acompanham desde a matéria-prima até o produto final (RIBEIRO, 2018). Para que o produto a ser vendido nos supermercados seja mantido de forma estável após o processamento industrial, são empregados diversos métodos que visam preservar a integridade do alimento tanto do ponto de vista físico quanto químico e microbiológico.

Os alimentos possuem particularidades que podem torná-los inadequados para o consumo. Essa inadequação pode ocorrer devido à decomposição dos alimentos por agentes físicos, químicos e biológicos, à contaminação acidental ou à introdução involuntária de substâncias tóxicas ou inconvenientes à saúde, à transmissão de doenças ao homem através de alimentos de origem animal, ou à contaminação dos

alimentos por micro-organismos que, muitas vezes, utilizam o alimento como meio de proliferação (PROENÇA, 2000; PEREDA *et al*., 2005; WOJSLAW, 2013, BARROS *et al*., 2020).

Com as mudanças ocorridas na alimentação contemporânea, como resultado do processo de globalização e da influência da indústria de alimentos, uma das principais preocupações do microbiologista de alimentos é o controle do desenvolvimento microbiano, visando eliminar riscos à saúde do consumidor. Entretanto, sempre existirá a possibilidade de o alimento ser contaminado por agentes patogênicos, seja por eventuais incorreções na sua manipulação e utilização, ou mesmo durante o seu processamento. (GUILHERME e ESTEVES, 2017; BARBOSA, 2019).

Os microrganismos, leveduras, bactérias e bolores se reproduzem rapidamente desde que as condições do meio onde se encontram sejam favoráveis. No entanto, alguns conseguem se reproduzir, mesmo que de maneira mais lenta, em ambientes desfavoráveis. O tratamento térmico necessário para destruir microrganismos ou seus esporos varia com o tipo de microrganismo, a forma como ele se encontra e o ambiente durante o tratamento.

Dessa forma, a pasteurização apresenta perspectivas tecnológicas para o consumo de alimentos da humanidade e vem sendo um método eficaz para garantir sua qualidade microbiológica (BRASIL, 2008). Este método térmico de preservação aumenta a durabilidade do produto e, consequentemente, minimiza as perdas, destruindo ou inativando os microrganismos patogênicos presentes no alimento.

Portanto, o desenvolvimento de novas tecnologias e a melhoria dos programas de controle de qualidade microbiológica usados durante o processamento, transporte, armazenamento e distribuição dos alimentos, associados à melhoria e ao controle das condições higiênico-sanitárias, representam um desafio para a indústria de alimentos. O objetivo é garantir a segurança microbiológica, aumentar a vida útil de prateleira e, ao mesmo tempo, tornar os alimentos seguros para o consumo humano.

2.2 Noções de Microbiologia dos alimentos

A primeira observação de micro-organismos foi realizada pelo pesquisador inglês Robert Hooke, em 1665, utilizando um microscópio que, apesar de rudimentar

para os padrões atuais, representava um importante avanço no século XVII. Outro nome de extrema importância para a área é o do cientista francês Louis Pasteur, cujas pesquisas possibilitaram descartar a teoria da geração espontânea, que afirmava que a vida surgia de matéria inanimada, ao comprovar a existência de organismos invisíveis a olho nu.

A Microbiologia é um ramo da biologia que tem como principal objetivo estudar os aspectos que envolvem o mundo microbiano, constituído por bactérias, fungos, protozoários, vírus e algas microscópicas presentes nas cadeias alimentares. Ela identifica os micro-organismos que desempenham papéis fundamentais no meio ambiente, na produção e na deterioração de alimentos, entre outras aplicações, além de descrever as formas de controlá-los e caracterizar o potencial dos microrganismos em todos os aspectos da vida humana (ADEBAYO *et al*., 2018; GOMES *et al.,* 2021; CRISTIANINI *et al.*, 2023).

Os alimentos contêm atividade biológica. Enquanto algumas atividades são essenciais para a produção de novos alimentos, outras podem causar estragos ou até contaminações, ocasionando infecções e intoxicações ao serem ingeridos. Em todas as fases do processamento, os alimentos estão suscetíveis a processos deteriorantes e de contaminação. A conservação inadequada torna o produto sujeito a riscos potenciais de contaminação microbiológica devido às condições ideais de temperatura para a sua proliferação (DOMINGUES *et al.*, 2023).

Microrganismos são organismos extremamente pequenos, visíveis individualmente apenas com o uso de um microscópio. Eles estão presentes em todos os ambientes, até mesmo nos alimentos. Um dos microrganismos que podem contaminar as frutas são os bolores, que são fungos filamentosos constituídos por hifas que, em conjunto, formam o micélio. O micélio tem a função de fixação e reprodução e é responsável pelo aspecto algodonoso (BARBEDO, 2025).

Nos alimentos, as bactérias e os fungos são os grupos mais estudados. Eles podem estar presentes nas matrizes alimentares como partes do produto, atuando como fermentadores. Por meio de seu metabolismo, eles transformam o alimento de maneira positiva e desejável para o consumo humano (RIBEIRO, 2018).

Ainda nos alimentos, os microrganismos podem desempenhar um papel muito importante, podendo ser tanto benéficos quanto prejudiciais. Os micro-organismos usados na produção de alimentos realizam funções positivas em alguns setores da

indústria alimentícia, tais como a produção de vinho, cerveja, produtos de panificação, derivados do leite, entre outros (ALMEIDA *et al.,* 2025; BARBEDO, 2025).

Os alimentos também podem ser contaminados pelo meio externo devido à preparação, manuseio e armazenamento. Nessas situações de contaminação, podem ocorrer intoxicações ou contaminações por patógenos. Para seu desenvolvimento, os microrganismos precisam de um ambiente favorável. Mais de 250 tipos diferentes de doenças de transmissão alimentar têm sido descritos. As doenças de notificação compulsória, conforme a Portaria 104, de 25 de janeiro de 2011 (BRASIL, 2011), do Ministério da Saúde são: cólera; febre tifóide; botulismo; hepatite A; rotavírus (em unidade sentinela) e variante da doença de Creutzfeldt-Jakob (VDCJ). Algumas são consideradas doenças transmitidas por alimentos (DTAs) emergentes, como: síndrome hemolítico-urêmica (SHU); síndrome de Creutzfeldt-Jakob; e campilobacteriose.

A importância das análises microbiológicas dos alimentos reside no fato de que elas são essenciais para avaliar os riscos à saúde do consumidor e o desempenho do controle higiênico-sanitário na elaboração dos produtos alimentícios (NEVES *et al.*, 2024).

2.3 Conservação e armazenamento de alimentos

Conservação é a arte que consiste em manter o alimento o mais estável possível, mesmo em condições nas quais isso não seria viável. A conservação de alimentos envolve três características: físicas, químicas e biológicas (ASSIS, 2012). Essas características dizem respeito aos cuidados relacionados ao manuseio, preparação e armazenamento dos alimentos, com o objetivo de diminuir o risco de contaminação e a ocorrência de doenças.

Não há registros históricos precisos acerca de como e quando surgiram os primeiros métodos de conservação de alimentos. Entretanto, evidências indicam que o homem pré-histórico já compreendia a importância de armazenar os excedentes alimentares obtidos em períodos de abundância para consumo durante fases de escassez.

Considerando que alimentos de origem animal e vegetal apresentam elevada suscetibilidade à deterioração, aliada à necessidade humana de prolongar sua

disponibilidade para consumo, diferentes técnicas de conservação foram desenvolvidas ao longo do tempo (BARROS *et al.,* 2020). Essas práticas surgiram, inicialmente, como estratégias essenciais à sobrevivência humana, permitindo a manutenção dos alimentos por períodos mais prolongados sem comprometer sua qualidade.

Os métodos de conservação de alimentos têm como objetivo aumentar a vida útil dos produtos por meio da aplicação de técnicas capazes de evitar alterações microbianas, enzimáticas, químicas e físicas, preservando seus nutrientes e características sensoriais perceptíveis pelos sentidos humanos, como cor, brilho, sabor, odor e textura (BARROS *et al.,* 2020). A avaliação do estado de conservação dos alimentos está diretamente relacionada às condições necessárias para o consumo humano seguro. Além disso, a crescente demanda por alimentos minimamente processados e livres de aditivos químicos representa um desafio para a indústria alimentícia.

Nesse contexto, surgem oportunidades para a utilização de compostos antimicrobianos naturais, provenientes de fontes vegetais, animais e microbianas, como alternativa para o controle de microrganismos indesejáveis nos alimentos (O'CONNOR *et al*., 2020; CRISTIANINI *et al*., 2023). Diversos métodos de conservação são empregados, destacando-se a conservação por secagem, irradiação, aplicação de calor, refrigeração, destruição mecânica de microrganismos e uso de conservantes (FREITAS; FIGUEREDO, 2000).

Segundo Anese (2015), o armazenamento de alimentos compreende a manutenção de produtos e ingredientes em um ambiente que proteja sua integridade e qualidade, impedindo a proliferação de bactérias e enzimas. É importante destacar que os frutos são organismos vivos, sendo necessário mantê-los em condições adequadas de armazenamento para evitar a perda de qualidade, bem como a incidência de podridões e distúrbios fisiológicos.

Os tipos de perdas que ocorrem em frutos segundo Anese (2015), quando estes são transportados, armazenados ou manuseados de forma inadequada são:

• **Perda quantitativa** – é a perda de peso de fruto (perda física), devido ao manuseio irregular da colheita, refletindo diretamente na remuneração do fruticultor.
• **Perda qualitativa** – é a redução do padrão de qualidade do fruto, relacionadas ao valor nutricional, refletindo em preço menor comparado a um fruto com maior qualidade.

• **Perda nutricional** – referente a atividade metabólica do fruto, sendo alta devido ao armazenamento inadequado, ocorrendo a redução do teor de vitaminas, lipídeos e proteínas.
• **Perda sensorial** – se dá em função das alterações na textura, relação ácido/açúcares e perda de aroma pelo armazenamento inadequado.

Conforme Almeida *et al.,* (2022), os métodos de conservação surgiram na época pré-histórica devido à necessidade de manter os alimentos disponíveis para consumo por mais tempo. Através deles, era possível atender à necessidade de mantimentos em períodos de escassez de alimentos. Foi nesse contexto que surgiu a necessidade de armazenar os alimentos, o que inicialmente foi feito por nossos ancestrais nas partes mais escuras e frias das cavernas (VASCONCELOS e MELO FILHO, 2010).

Diante disso, surgiram os métodos oriundos das experiências e observações, inicialmente os seguintes:

- **Secagem** (exposição dos alimentos para secarem ao sol),
- **Defumação** (aplicação de fumaça para retirar água e melhorar cor e sabor),
- **Salga** (adição de sal aos alimentos) e o uso do vinagre e do álcool.

Historicamente, de acordo com Furtado (2021), os métodos de conservação foram implantados como alternativa para a industrialização de alimentos. Esses métodos pioneiros ainda são válidos e foram importantes para o desenvolvimento de novos métodos com o passar dos anos. Contudo, uma grande parte dos processos de preparação e conservação de alimentos conta com a aplicação ou a remoção de calor. No entanto, um dos parâmetros mais importantes no estabelecimento da vida útil de um alimento é o binômio tempo temperatura de processamento. Os alimentos com pH acima de 4,5 e atividade de água superior a 0,85, chamados de alimentos de baixa acidez, normalmente toleram tratamentos térmicos muito mais rigorosos do que aqueles com pH menor do que 4,5 (FURTADO, 2021).

Os métodos de conservação podem ser considerados como medidas de controle da multiplicação dos microorganismos nos alimentos, dentre eles: o calor, frio, controle de umidade, aditivos, fermentação, salga, defumação, dentre outros. Como regra geral, os melhores processos são aqueles que, garantindo uma satisfatória

conservação, alteram menos as condições naturais dos produtos, (OLIVEIRA *et al*., 2019).

Dentre os processos de aplicação de calor destacam-se pela sua importância:

- **PASTEURIZAÇÃO:** são métodos de conservação com a aplicação de calor a um alimento com tempo e temperatura determinados conforme o tipo de alimento. O binômio tempo e temperatura tem a finalidade de eliminar significativamente os microrganismos e evitar o seu desenvolvimento, o que ajuda a prolongar a vida útil do alimento.
- **COZIMENTO:** é um processo que além de tornar o alimento mais saboroso, promove a preservação através da destruição de enzimas e de microorganismos. Esta operação pode ser conduzida de várias formas, todas elas envolvendo um aquecimento intenso do alimento. Assim, o cozimento pode ser obtido pelo ato de assar, torrar, fritar ou cozer.
- **BRANQUEAMENTO:** é uma operação de aquecimento moderado por tempos relativamente curtos, realizada em alimentos de origem vegetal antes do processo de congelamento, secagem ou enlatamento. Para esse tipo de processo pode ser realizado com vapor saturado ou água quente.
- **ESTERILIZAÇÃO:** é um tratamento térmico de maior intensidade (temperaturas acima de 100 ^{0}C), com o objetivo da completa destruição dos esporos dos micro-organismos patogênicos e daqueles deterioradores com possibilidade de crescer nas condições de estocagem do produto.

Dentre os processos de aplicação de conservação pelo frio destacam-se pela sua importância:

- **REFRIGERAÇÃO E CONGELAMENTO:** são métodos de conservação com a aplicação de temperaturas baixas. A refrigeração ocasiona uma conservação a curto prazo variando de 0 a 7º C, enquanto o congelamento é considerado um método de conservação a longo prazo, com temperaturas abaixo de 0° C, com objetivo de minimizar as reações enzimáticas, físico-químicas e microbiológicas.

A escolha do método mais apropriado de conservação dos alimentos, vai depender de alguns fatores, como: a natureza do alimento (líquido, sólido ou pastoso),

período de tempo a conservar, custo do processo e os agentes de deterioração envolvidos.

O processamento de conservação de alimentos por meio da aplicação de calor é um método amplamente utilizado para aumentar a vida de prateleira dos produtos, possibilitando a inativação ou a inibição do crescimento de microrganismos e enzimas (MACHADO, 2023). Porém, podem apresentar, como desvantagem, alterações sensoriais e nutricionais no produto. Entretanto, é fundamental que este método considere a componente "segurança" do alimento visando eliminar riscos à saúde do consumidor.

Diante desse contexto, diversas técnicas são utilizadas para a conservação de alimentos, destacando-se a pasteurização como um dos processos mais empregados na indústria alimentícia, especialmente no processamento de polpas de frutas. A pasteurização tem como principal finalidade a destruição das células vegetativas de microrganismos patogênicos e deteriorantes, bem como a inativação enzimática da polpa, contribuindo para a manutenção da qualidade do produto e possibilitando sua distribuição e transporte por longas distâncias (MARTINS, 2017; MACHADO, 2019; CHILANTI *et al.,* 2024).

2.4 Pasteurização

O processo de pasteurização, desenvolvido pelo químico francês Louis Pasteur em 1864, consiste na neutralização de microrganismos patogênicos presentes nos alimentos comestíveis. Demonstrou-se que o aquecimento de certos produtos a temperaturas superiores a 60 °C, por um intervalo de tempo específico, evitava que o alimento se deteriorasse. Atualmente, com o processo bastante aprimorado, a pasteurização é uma das operações mais utilizadas na indústria de alimentos (REVISTA INSUMOS, 2021).

A pasteurização é um tratamento térmico moderado aplicado aos alimentos com o objetivo de reduzir microrganismos patogênicos e aumentar a vida útil do produto. O processo consiste no aquecimento controlado do alimento a temperaturas inferiores a 100 °C por um determinado intervalo de tempo, sendo amplamente utilizado em leite e derivados, bebidas e polpas de frutas (OPAS, 2019).

Após o aquecimento, o produto passa por resfriamento rápido, etapa essencial para interromper as reações térmicas e evitar a multiplicação de microrganismos remanescentes, contribuindo para a manutenção da qualidade e segurança alimentar (MACHADO, 2019; VASQUES, 2025).

Para o estabelecimento do tratamento térmico a ser aplicado em um alimento, devem ser considerados os seguintes fatores: parâmetros cinéticos de resistência térmica do microrganismo mais resistente, geralmente patogênico, e a sensibilidade ao calor dos atributos de qualidade do produto (ERDAL *et al*., 2022). No entanto, para que atenda às expectativas do consumidor e minimize as perdas comerciais, a pasteurização térmica deve ser eficaz, permitindo um maior tempo de conservação do produto, mantendo seu valor nutritivo e sem causar danos à saúde das pessoas.

A indústria alimentar tradicionalmente aplica métodos de processamento térmico para garantir a segurança alimentar. Assim, é importante notar que, para uma grande variedade de alimentos líquidos ou pastosos, é possível utilizar temperaturas para a inativação microbiana. No entanto, alguns agentes patogênicos não são tão resistentes ao calor quanto algumas leveduras presentes nos sucos de frutas. A temperatura e o tempo de pasteurização térmica dependem dos patógenos-alvo a serem controlados em cada alimento (SHYAM *et al.,* 2023).

O binômio temperatura e tempo necessários para destruir um microrganismo e seus esporos dependem da sua termoresistência. A eficácia da aplicação de tratamentos térmicos na destruição dos microrganismos deve-se à desnaturação de suas proteínas e enzimas necessárias ao metabolismo celular. Porém, muitos microrganismos formam esporos, que resistem a elevadas temperaturas (MAIA, 2012; OPAS, 2019).

2.4.1 Tipos de pasteurização

A pasteurização varia conforme o método e o produto a ser tratado. Segundo Wojslaw (2013), Ataíde (2014) e Machado (2019), ela é utilizada quando tratamentos térmicos mais intensos causam perdas significativas de qualidade, quando os microrganismos responsáveis por mudanças no alimento não são muito resistentes ao calor, ou quando é necessário eliminar agentes competidores. Existem três tipos de pasteurização, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tempos e temperaturas de pasteurização.

TIPO	TEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)
LTHT	30 min	62 – 68
HTST	15 - 20 s	72 – 85
UHT	2 - 5 s	135-150

Fonte: Autoria própria.

A pasteurização pode ser rápida ou lenta, a diferença entre elas está na faixa de temperatura e consequentemente do tempo de exposição.

- **LHT** (*low temperature holding*) ou pasteurização baixa: são utilizadas temperaturas relativamente baixas (62 a 68 ºC), se comparadas às empregadas na pasteurização rápida, sendo utilizado tempos de aproximadamente 30 minutos. É realizada em tanques de paredes dupla, onde circulam o fluido calefator e o refrigerador.

- **HTST** (*high temperature, short time*) ou pasteurização alta: esse método é realizado em sistemas de fluxo contínuo com trocadores de calor (tubulares ou de placas). Empregam-se temperaturas relativamente altas em curto espaço de tempo, em torno de 72 ºC a 85 ºC por aproximadamente 15 a 20 segundos.

- **UHT** (*Ultra High Temperature*), é um método de tratamento térmico que consiste em submeter o alimento, geralmente líquido, a temperaturas extremamente elevadas entre 135 °C e 150 °C por um curto intervalo de tempo, geralmente de 2 a 5 segundos.

2.4.2 Pasteurização por Banho Maria.

O banho maria é uma técnica muito comum em laboratórios industriais e culinária, já que nele se exige precisão e controle sobre os ingredientes. O processo recebe o nome em honra à famosa alquimista e filosofa grega, Maria, a Judia/profetisa (273 a.C.), a quem atribui-se a invenção do processo para um aquecimento lento e gradual dos experimentos. Em vez de manipular as substâncias diretamente no fogo,

ela descobriu que era possível controlar melhor a temperatura se fosse por meio da água.

No contexto da produção e manipulação de alimentos, o método do banho-maria é amplamente empregado por permitir um aquecimento gradual e controlado, sendo especialmente útil em preparações que exigem temperaturas moderadas e estáveis, como sobremesas, molhos e outros produtos sensíveis ao superaquecimento.

Esse procedimento consiste em submeter um recipiente contendo o alimento a ser aquecido à imersão parcial em outro recipiente maior com água previamente aquecida, promovendo um controle térmico uniforme e reduzindo o risco de alterações indesejadas nas propriedades físico-químicas do produto. A utilização do banho-maria contribui, portanto, para a preservação das características sensoriais e nutricionais dos alimentos, além de garantir maior segurança no processamento térmico.

De forma semelhante, na indústria alimentícia, o banho-maria desempenha um papel crucial na pasteurização de polpas de frutas, aquecendo os produtos de maneira uniforme e controlada. Esse processo é fundamental para garantir a eficácia da pasteurização e para manter a qualidade e segurança dos alimentos.

Neste trabalho, o equipamento utilizado para o banho-maria foi da marca Kacil, modelo BM02, que opera com temperaturas de até 100ºC e utiliza água como fluido térmico. O recipiente com a amostra é colocado dentro da cuba do banho, que contém água quente. Assim, a temperatura ajustada no banho é transferida para a amostra imersa, permitindo a termorregulação por meio do controle da temperatura do fluido térmico de forma lenta e uniforme.

2.5 Trabalhos que utilizaram calor como método de conservação

A utilização do calor na conservação de alimentos exerce um efeito destrutivo sobre os microrganismos. Conforme mencionado por Brarros *et al*., (2020), “se o tratamento térmico não conseguir destruir todos os microrganismos, ele deve pelo menos eliminar os mais prejudiciais e retardar ou prevenir o crescimento dos sobreviventes”.

A seguir, são apresentados alguns estudos que aplicaram o tratamento térmico na conservação de alimentos, levando em consideração as características do produto, o

tipo e a forma dos microrganismos presentes, as condições ambientais durante o tratamento e o prazo de validade desejado para o produto.

Simões e Murr (2000) determinaram a difusividade térmica em quatro tipos diferentes de polpa de manga (polpa integral, peneirada, centrifugada e concentrada). Os autores analisaram a influência dos sólidos solúveis e insolúveis. Os resultados mostraram que, para as polpas integral, centrifugada e peneirada, os sólidos insolúveis não tiveram uma grande influência na difusividade térmica. No entanto, as polpas concentradas apresentaram uma redução na difusividade térmica com o aumento da concentração de sólidos solúveis.

Teixeira *et al.* (2006) investigaram a pasteurização da polpa de graviola. Inicialmente, realizaram avaliações microbiológicas, enzimáticas e de cor da polpa para identificar os parâmetros a serem monitorados durante o processo de pasteurização. O produto foi submetido a tratamento térmico em copos de inox, variando os tempos (de 1 a 300 segundos) e as temperaturas (de 70°C a 90°C), a fim de identificar o efeito dessas variáveis sobre os parâmetros de qualidade. Constatou-se que a pasteurização da polpa de graviola a 80°C ou 90°C foi eficaz, proporcionando uma vida útil de 120 dias à temperatura ambiente (25°C).

Pelais *et al.* (2008) realizaram um estudo detalhado sobre o processo de pasteurização da polpa de murici, com foco na avaliação de sua vida de prateleira. O estudo foi conduzido em escala de bancada e incluiu testes em três temperaturas diferentes (70, 80 e 90 ºC) e em três tempos de exposição (1, 60 e 300 segundos). A pasteurização teve um efeito significativo na segurança microbiológica, eliminando fungos e diminuindo de forma eficaz a carga bacteriana nas amostras tratadas. No entanto, observou-se uma leve variação nas variações de cor em poucas amostras, com uma alteração inferior a 1%. Em algumas amostras foi adicionado conservante. Posteriormente, as amostras foram armazenadas a 25 ºC por um período de 120 dias. Os pesquisadores concluíram que os tratamentos foram eficientes em relação às variáveis avaliadas, em todas as condições, estando os produtos aptos para o consumo, de acordo com a legislação brasileira. Entretanto, a pasteurização das amostras, sem adição de conservante, mostrou-se adequada para a produção em pequena escala.

Tres *et al*. (2011) estudaram a importância do coeficiente de difusividade térmica para qualquer substância líquida ou pastosa. Eles desenvolveram um aparato experimental, bem como uma rotina computacional para a simulação do processo de transferência de calor em coordenadas cilíndricas. Seus resultados mostraram uma

tendência de que, quanto maior a temperatura, maior será o coeficiente de difusividade térmica. Através de um *software* computacional em linguagem Fortran, simularam os resultados experimentais, proporcionando maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Lewis (2014) estudou o tratamento de temperatura ultra-alta com o objetivo de obter um produto comercialmente estéril que apresente boas características organolépticas ao longo de sua vida útil. O processo envolve o aquecimento rápido de um alimento a cerca de 140°C, mantendo-o por um curto período de tempo, resfriando-o rapidamente e, finalmente, embalando-o em condições assépticas. Ele definiu que esse método pode ser aplicado a qualquer alimento que possa ser bombeado através de um trocador de calor.

Araújo *et al.* (2016) realizaram simulações de aquecimento da polpa de caju contida em recipientes com as mais diferentes formas geométricas, desde que possam ser obtidos através da revolução de uma área plana. A solução proposta foi capaz de identificar o ponto com maior fator de atraso no processo de pasteurização, permitindo que a cinética de aquecimento desse ponto do produto seja acompanhada de forma a garantir que a temperatura de inativação dos agentes patogênicos seja atingida. Isso é uma vantagem do ponto de vista industrial, pois possibilita que a indústria altere a geometria das embalagens sem a necessidade de investimentos em experimentos, reduzindo os custos.

Cebrián *et al*. (2017) afirmam que os tratamentos térmicos são amplamente empregados na indústria alimentícia nos processos de pasteurização e esterilização, com o objetivo de garantir a segurança microbiológica dos alimentos. Os autores destacam que a resistência microbiana ao calor pode variar conforme a espécie bacteriana e as condições ambientais, sendo influenciada por fatores como temperatura, composição do meio, exposição prévia a estresses e condições pós-tratamento. O estudo evidencia ainda que o calor pode provocar danos subletais às células bacterianas, possibilitando sua recuperação em ambientes favoráveis. Além disso, os autores ressaltam a importância da aplicação de processos combinados e do desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de otimizar os tratamentos térmicos, contribuindo para a produção de alimentos mais seguros e com menor perda das características nutricionais e sensoriais.

Segundo Martins *et al*. (2017), ao empregar o binômio tempo/temperatura para a polpa de gabiroba, com o tratamento térmico a 100 °C por 5 minutos, houve alteração nas características físico-química e sensoriais (especialmente na cor) da

polpa, resultando em um aspecto de 'cozido' e coloração tendendo ao marrom. No entanto, a amostra se mostrou segura do ponto de vista microbiológico.

Siguemoto *et al.* (2018) avaliaram uma unidade piloto de pasteurização assistida por micro-ondas aplicada ao processamento contínuo de alimentos líquidos de baixa viscosidade, visando modelar a transferência de calor e a distribuição do tempo de residência do fluido no processo. Os autores verificaram que o escoamento apresentou comportamento do tipo plug-flow, com dispersão axial desprezível, além de determinarem os coeficientes de transferência de calor em função do número de Reynolds e da potência absorvida pelas micro-ondas. A modelagem matemática permitiu prever a distribuição de temperatura ao longo do percurso do produto e validar os resultados experimentais. O estudo demonstrou que o aquecimento por micro-ondas promoveu rápido aumento de temperatura, contribuindo minimamente para a letalidade total do processo quando comparado ao aquecimento convencional. Dessa forma, os autores concluíram que a tecnologia apresenta potencial para otimizar processos contínuos de pasteurização, aumentando a eficiência térmica e reduzindo o tempo de processamento.

Etzbach *et al*. (2019) estudaram os efeitos da pasteurização e do tratamento com ultrassom sobre a atividade da peroxidase, composição de carotenóides e nas propriedades físico-químicas (° Brix, pH e cor) do purê de amora silvestre (*Physalis peruviana L.*). De acordo com eles, a inativação completa da Peroxidase foi alcançada apenas pela pasteurização convencional, mas a ela foi associada perdas de aproximadamente 11,5% do total de carotenoides. Ainda segundo os autores, a intensificação do ultrassom levou a maior capacidade de extração de carotenoides, aproximadamente de 14,7 %. Os autores concluíram que tanto o tratamento térmico convencional quanto o processo de ultrassom provocaram mudanças no perfil de carotenoides, devido a isomerização e a outras reações de degradação que afetam a atividade provitamina A. Por fim, eles afirmaram que o tratamento com ultrassom pode ser sugerido como uma técnica promissora para melhorar o valor do purê de amoras silvestres.

Segundo estudos de Oliveira *et al*. (2019), após avaliar o efeito da pasteurização por aplicação de calor e por micro-ondas sobre o perfil sensorial da polpa de maracujá, utilizando o teste de dominância temporal das sensações (TDS), foi possível perceber que, quanto maior a severidade do tratamento térmico, maior a

percepção de sabor de fermentado nos sucos, descaracterizando o produto quando comparado ao suco sem tratamento térmico.

Damasceno *et al.* (2020), em seus estudos, avaliou diferentes binômios tempo/temperatura de pasteurização da polpa de gabiroba *in natura* para definir a eficiência do tratamento térmico por meio da avaliação dos parâmetros microbiológicos. Foram testados quatro tratamentos (T1: 85 °C/3 min; T2: 85 °C/5 min; T3: 90 °C/3 min; e T4: 90 °C/5 min) e um controle (polpa não pasteurizada). Os quatro tratamentos térmicos se mostraram eficientes na eliminação dos micro-organismos presentes na polpa *in natura*, e não foram observadas diferenças na acidez e pH entre os tratamentos ($p < 0,05$). Diante dos resultados, o tratamento considerado mais recomendável foi o Tratamento 1 (85 °C/3 minutos), por empregar menor temperatura por um período mais curto, o que ocasiona menor alteração visual na polpa.

Da Silva *et al.* (2020), em seus estudos, determinaram a difusividade térmica da polpa de coco verde armazenada em recipiente metálico em formato de paralelepípedo durante o aquecimento em tratamento térmico. Um termopar foi colocado no centro do recipiente com o produto, inicialmente a 25,8 °C, e, em seguida, o conjunto foi mergulhado em banho-maria a 64,85 °C. A temperatura ao longo do tempo foi registrada em um arquivo.txt, possibilitando determinar os parâmetros de uma função que representa a difusividade térmica, utilizando uma técnica de otimização que também exigiu uma solução numérica tridimensional da equação. Assim, foi possível estabelecer o tempo necessário para interromper com segurança um novo processo de aquecimento durante outro tratamento térmico, com uma simulação simples, sem a necessidade de um novo experimento.

Sürmeli *et al.* (2021) analisaram o controle térmico em processos de pasteurização rápida (flash pasteurization) de sucos de frutas, destacando a importância da relação entre tempo e temperatura para garantir a segurança microbiológica e a qualidade do alimento. Os autores utilizaram espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) associada a modelos matemáticos de regressão para estimar as unidades de pasteurização aplicadas ao produto. Os resultados apresentaram elevados índices estatísticos, com valores de RMSECV próximos de 2,78 ± 0,09 e coeficiente de determinação R^2 entre 0,96 e 0,98, demonstrando alta precisão na estimativa do tratamento térmico. O estudo também evidenciou que métodos convencionais de monitoramento térmico podem gerar margens excessivas de segurança, ocasionando

perdas nutricionais e sensoriais nos alimentos. Dessa forma, a pesquisa destacou a importância da modelagem matemática e da transferência de calor na otimização de processos de conservação térmica na indústria alimentícia.

Oishi e Gut (2021) destacam que a pasteurização contínua de alimentos líquidos deve garantir a segurança alimentar com mínima degradação das propriedades sensoriais e nutricionais, além de elevada eficiência energética. Os autores apresentaram uma modelagem simplificada em 2D para analisar o histórico de tempo e temperatura e o valor de esterilização do purê de manga submetido à pasteurização convencional e assistida por micro-ondas sob fluxo laminar. O estudo utilizou purê de manga a 20 °Brix, caracterizado como fluido do tipo lei da potência, em uma planta piloto experimental. Os resultados demonstraram que o modelo é eficiente para comparar os métodos de aquecimento e pode ser aplicado na análise, no projeto e na otimização de processos térmicos industriais.

Para Silva e Caron (2022), as polpas de fruta são produtos processados utilizados para consumo humano. A qualidade do produto a ser entregue ao consumidor final é avaliada a partir de análises físico-químicas, como pH, acidez total, teor de sólidos solúveis, vitaminas, lipídios, fibras, entre outros. Os autores concluíram que foram poucos os estudos que demonstraram polpas que não sofreram perdas nutricionais ou nos teores dos parâmetros físico-químicos.

Müller *et al.* (2022) analisaram a inativação do fungo termorresistente Aspergillus fumigatus em suco de maçã, comparando o aquecimento convencional (CH) e o aquecimento ôhmico (OH) por meio da integração de modelos térmicos e cinéticos, utilizando abordagens espacialmente isotérmica e puramente difusiva. Eles observaram que a temperatura foi o principal fator determinante do tempo de processamento, de modo que o aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo necessário para atingir a redução microbiológica de 5-log. Além disso, eles verificaram que, no processo convencional, o aumento da vazão contribuiu para a redução do tempo de tratamento, enquanto no aquecimento ôhmico o aumento do campo elétrico intensificou o aquecimento e reduziu ainda mais o tempo de processo. Eles constataram que o aquecimento ôhmico apresentou sempre menores tempos de processamento em comparação ao convencional, variando aproximadamente entre 4,6 e 143,4 minutos, enquanto no CH os tempos variaram entre 18,9 e 156,4 minutos. Esse comportamento foi atribuído à geração interna de calor e à possível atuação de efeitos não térmicos, como a eletroporação celular. Eles também observaram que as diferenças

entre os modelos isotérmico e difusivo foram pequenas no OH, indicando maior uniformidade térmica, enquanto no CH o modelo difusivo resultou em tempos mais elevados devido à presença de gradientes de temperatura mais acentuados. Por fim, eles concluíram que a integração entre modelagem térmica e cinética de inativação foi eficiente para comparar as tecnologias, evidenciando que o aquecimento ôhmico é uma alternativa mais eficaz para a pasteurização, pois reduz o tempo de processamento, melhora a homogeneidade térmica e aumenta a eficiência de inativação microbiológica.

Bermudez-Aguirre e Niemira (2022) revisaram a aplicação do ultrassom de baixa frequência (16 - 100 kHz) na pasteurização de alimentos, destacando que a cavitação acústica, com temperaturas de ~5500 °C e pressões de 50 MPa nos "hot spots", promove a inativação de patógenos (E. coli, Salmonella, L. monocytogenes) e enzimas (PPO, POD, PME) quando combinada a calor (60 - 90 °C), alcançando reduções ≥ 5 log em leite de amêndoa (40 kHz, 600 W, 60 °C, 40 min), suco de ameixa-da-china (> 5 log de aeróbios e > 4 log de leveduras a 40 kHz, 400 W, 60 °C, 30 min) e leite de cabra (> 6 log de aeróbios a 20 kHz, 90 °C, 10 min). A tecnologia aumenta o conteúdo de polifenóis em até 139% (suco de amora) e a atividade antioxidante em 46 - 65%, embora degrade ácido ascórbico (redução de 29–78%). Adicionalmente, a inativação enzimática atinge 92 - 100% para peroxidase e polifenoloxidase em purê de goldenberry e suco de manga, respectivamente, enquanto bactérias Gram-positivas e formas esporuladas (Bacillus spp.) exigem condições mais intensivas devido à maior resistência estrutural. A sonificação também modifica propriedades reológicas, aumentando a viscosidade do leite de amêndoa em 18% e conferindo efeito homogeneizador aos produtos lácteos, embora leites sonificados historicamente apresentassem defeitos aromáticos ("borrachudo", "metálico") atribuídos à formação de cetonas e aldeídos. Os principais desafios apontados são a erosão de sonotrodos de titânio com liberação de partículas metálicas, a falta de padronização de parâmetros processuais entre estudos e a necessidade de investigações toxicológicas sobre subprodutos da cavitação, como os derivados da degradação de pesticidas em leite, que podem apresentar toxicidade superior aos compostos originais.,

Kravets *et al.* (2023) investigaram a aplicação da pasteurização HTST, realizada a 80 °C por aproximadamente 10 segundos, utilizando aquecimento convencional e por radiofrequência na conservação de salmorejo embalado em garrafas de HDPE. Os autores observaram que o tratamento térmico foi eficiente na inativação de bactérias mesofílicas e patogênicas, permitindo uma vida útil de

aproximadamente quatro meses sob armazenamento refrigerado. O estudo também demonstrou que, apesar da estabilidade microbiológica alcançada, ocorreram processos de oxidação enzimática associados às enzimas PPO e POD, responsáveis por alterações sensoriais ao longo do armazenamento. Além disso, os autores destacaram que tratamentos térmicos menos intensos e a utilização da tecnologia de radiofrequência apresentam potencial para melhorar a qualidade sensorial do produto e aumentar a eficiência energética nos processos de conservação de alimentos.

Baghabrishami e Goli (2023), em seus estudos, aplicaram tratamento térmico (de acordo com a condição de pasteurização comercial) em resíduos de tomate como fonte de óleo comestível e preparou uma nova bebida composta de suco de tomate e óleo de semente de tomate em emulsões aquosas. Este estudo revelou que a aplicação foi eficaz no aumento da digestão do óleo e na bioacessibilidade do licopeno no suco de tomate.

Wazed *et al*. (2023) demonstraram que frutas perecíveis podem ser transformadas em atraentes coquetéis de sucos, aumentando as características sensoriais e, consequentemente, o valor agregado dos produtos. Através de experimentos, descobriram as temperaturas aceitáveis de pasteurização e armazenamento para um coquetel de suco de manga e abacaxi. Com base nos dados obtidos, o tratamento térmico a 60 °C por 20 minutos, seguido de armazenamento a 4 °C, apresentou melhor retenção de vitamina C, pH, acidez, sólidos solúveis totais (SST), estabilidade de turvação e açúcar total. Pode-se concluir que a pasteurização e a temperatura de armazenamento de coquetéis de suco de frutas são viáveis para satisfazer os gostos e preferências dos consumidores.

Chilanti *et al.* (2024) estudaram o efeito da pasteurização nas características químicas, físicas e microbiológicas do pêssego. Para isso, foram avaliados o teor de compostos fenólicos totais, carotenoides totais, atividade antioxidante, cor, pH, acidez, sólidos solúveis, *Escherichia coli, Salmonella sp.,* bolores, leveduras e coliformes a 45°C das frutas picadas ou trituradas e pasteurizadas (90 °C por 1, 2 e 3 minutos) em comparação com o controle (sem pasteurização). Os resultados mostraram que o tratamento térmico reduziu o teor de carotenoides totais, mas não influenciou nos teores de compostos fenólicos totais e na atividade antioxidante nos três tempos de tratamento. A pasteurização influenciou nos parâmetros de cor, aumentando a tendência à cor alaranjada das amostras trituradas. Concluiu-se que a pasteurização a

90 °C por 1 minuto é uma opção viável e segura para preservar as características do pêssego e aumentar a utilização desta fruta.

Russo *et al.* (2025) investigaram a aplicação do aquecimento por micro-ondas na pasteurização contínua de sucos e polpas de frutas, visando aumentar a eficiência energética e preservar as características sensoriais e nutricionais dos alimentos. Os autores destacaram que a tecnologia de micro-ondas proporciona aquecimento rápido e volumétrico, reduzindo perdas de qualidade quando comparada aos trocadores de calor convencionais. O estudo desenvolveu um modelo multifísico no *software* COMSOL 5.3 para simular o aquecimento de suco de laranja, suco de manga e purê de manga em um pasteurizador piloto operando com vazões entre 0,2 e 1,2 L/min e temperaturas de saída entre 70 °C e 100 °C. A cavidade de micro-ondas utilizada possuía gerador de 6 kW operando a 2,45 GHz e incluía um sistema ajustador de três stubs para minimizar a reflexão de energia. Os resultados demonstraram erro médio de predição de temperatura de aproximadamente 1,6 °C para suco de laranja e entre 1,8 °C e 5,5 °C para os produtos à base de manga, validando o modelo experimentalmente. Além disso, os autores concluíram que o modelo apresenta potencial para análise, projeto e otimização de sistemas de pasteurização assistidos por micro-ondas, contribuindo para processos mais eficientes e sustentáveis na indústria alimentícia.

2.6 Frutas tropicais

O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo, ficando atrás apenas da China e da Índia, com uma produção superior a 43,6 milhões de toneladas e uma participação de 4,6% na produção global de frutas (ABRAFRUTAS, 2025). Esse desempenho é devido às condições climáticas vantajosas em quase todo o território brasileiro, que favorecem o cultivo de uma ampla diversidade de frutas, desde as nativas até as tropicais (CARVALHO *et al.,* 2024).

Frutas tropicais são predominantemente cultivadas em climas quentes e úmidos, com temperaturas elevadas e alta umidade durante o ano inteiro (SANTOS, 2021). Elas se destacam por sua diversidade de sabores, texturas e valor nutricional, oferecendo uma rica fonte de vitaminas, minerais e antioxidantes. Além de sua importância nutricional, essas frutas desempenham um papel econômico significativo em várias regiões tropicais (MORGADO, 2022). Adaptadas a essas condições

específicas, são essenciais tanto para a alimentação local quanto para a economia das áreas onde são cultivadas, contribuindo para o sustento e o desenvolvimento das comunidades que dependem dessa atividade (PEDROSA, 2015).

No Brasil, a área total dedicada ao cultivo de frutas é de aproximadamente 2,2 milhões de hectares, empregando cerca de 27% da mão de obra na cadeia alimentar da agroindústria e gerando aproximadamente 5 milhões de empregos diretos (ABRAFRUTAS, 2025). Nesse cenário, com um clima favorável e solos férteis, o Nordeste se destaca como um importante polo produtor de frutas no país, contribuindo significativamente para a economia regional (ABRAFRUTAS, 2025).

2.6.1 Fruta Pesquisada: Graviola

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), a graviola (*Annona muricata L.*) é amplamente cultivada e comercializada nas regiões tropicais, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, sendo os maiores produtores localizados no Nordeste (DE SOUZA BARBOSA *et al.*, 2014). De acordo com a Agência de Defesa Agropecuária da Bahia (QUEIROGA *et al.*, 2024), o cultivo da graviola no Brasil apresenta forte concentração regional, sendo o estado da Bahia historicamente apontado como principal produtor nacional. Além da Bahia, a fruta também é cultivada em outros estados, como Alagoas, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Pará e Minas Gerais (EMBRAPA, 2021).

Conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), nos primeiros cinco meses de 2023, as exportações brasileiras de frutas superaram os volumes e receitas do mesmo período de 2022. O volume total exportado foi de 420,3 mil toneladas, o que representa um aumento de 3,61% em relação ao ano anterior. Além disso, a receita alcançou US$ 453,3 milhões, um crescimento de 18,1% em comparação com o mesmo período de 2022.

De acordo com Pinto (1995), a graviola tem suas origens nas terras baixas da América Tropical, especificamente na América Central e nos vales peruanos. Os exploradores espanhóis a encontraram prosperando abundantemente no Caribe e, a partir daí, a disseminaram para outras regiões tropicais ao redor do mundo. Hoje, a graviola é uma fruta de grande importância na região quente e semiárida do Nordeste do Brasil.

A graviola (Figura 2.1) foi introduzida no Brasil pelos portugueses no século XVI, muito provavelmente pelo fato dela preferir climas úmidos e baixas altitudes.

Figura 2.1: Graviola (*Annona Muricata L.*).



Fonte: Getty Images.

Pertencente a uma família com cerca de 119 gêneros e mais de 2.000 espécies, a graviola é uma árvore sempre-verde, de porte ereto e crescimento terrestre, podendo atingir entre 5 e 8 metros de altura. Suas folhas são largas, de coloração verde-escura, com superfície de aspecto suave e brilho característico (SÃO JOSÉ *et al.*, 2014).

Embora seja nativa das regiões tropicais da América Central e do norte da América do Sul, a graviola apresenta ampla distribuição em áreas tropicais de diferentes continentes, devido à sua boa adaptação a climas quentes e úmidos (FREITAS, 2012).

Além de seu valor botânico, a graviola é considerada uma fruta exótica de grande relevância socioeconômica nos países produtores, contribuindo para a geração de emprego e renda. Também se destaca no mercado internacional devido ao seu valor nutricional e às suas propriedades funcionais (SÃO JOSÉ *et al.*, 2014). A Tabela 2.2 apresenta os valores médios da composição nutricional da graviola.

Tabela 2.2: Composição nutricional média da Graviola, *in natura*.

Graviola (Fruto- 100g)	Quantidade por porção (100g)
calorias	62 kcal
Água	82,8 g
Proteína	0,9 g
Gorduras monoinsaturadas	0,1 g
carboidratos	14,63 g
Fibras alimentares	0,0 g
Fibras solúveis	40,1 g
Vitamina A	2 iu
Vitamina C	19,1 g
Piridoxina B6	0,0 g
Fósforo	19,2 g
Manganês	0,1 g
Magnésio	23,5 mg
Lipídios	0,2 g
Ferro	0,2 mg
Cobre	0,0 ug
Zinco	0,1 g
Tiamina B1	0,2 mg
Riboflavina B2	0,1 mg
Sódio	4,2 mg
Calcio	40,1 mg
Potássio	249,7 mg

- Percentual de valores diários com base numa dieta de 2000 kcal.

Fonte: COCAR & CO - Amazonian Natural Products (2015).

As frutas tropicais, como a graviola, destacam-se por sua sazonalidade, com produção restrita a determinadas épocas do ano. A graviola é uma fruta ovalada, suculenta, de coloração verde-escura e coberta por espinhos moles, com uma polpa branca e cremosa. Ela pode medir entre 20 e 25 cm de comprimento e 10 a 12 cm de diâmetro, pesando até 2,5 kg. É importante colher a graviola antes de atingir a maturação total, pois, ao amadurecer, a fruta tende a cair da árvore e se deteriorar.

A colheita da graviola ocorre de 14 a 24 meses após o plantio, com uma produção significativa sendo alcançada após cerca de 36 a 48 meses (FREITAS *et al.*, 2013). Quando madura, a casca da graviola muda de verde-escuro para verde-claro e

brilhante, e o fruto se torna macio. A graviola é comumente consumida crua ou transformada em produtos como sucos, sorvetes, compotas, geleias e doces, sendo apreciada por seu sabor característico e baixo teor calórico; 100 g da fruta contêm em média 60 calorias (BAPTESTINI *et al.,* 2015).

De acordo com a Instrução Normativa Nº 1, de 7 de janeiro de 2000, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (BRASIL, 2000), que regulamenta a qualidade das polpas de frutas comercializadas no Brasil e estabelece os Padrões de Identidade e Qualidade (PQIs), a polpa de fruta é um produto não fermentado, não concentrado e não diluído, obtido a partir de frutos polposos (BRASIL, 2000). Este produto deve ser produzido por meio de um processo tecnológico apropriado e possuir um mínimo de sólidos totais provenientes da parte comestível do fruto. Na Tabela 2.3 são apresentados alguns parâmetros físico-químicos da graviola.

Tabela 2.3: Alguns parâmetros da Graviola.

Caraterísticas e organolépticas		Composição físico-química – min./máx.	
Cor	variando branco ao marfim	Sólidos solúveis em o Brix, a 20° C	9,00 / -
		PH	3,5 / -
Sabor	ácido	Acidez total expressa em ácido cítrico (g/100g)	0,60 / -
		Ácido ascórbico (mg/100mg)	10,0v/ -
Aroma	próprio	Açúcares totais naturais da graviola (g/100g)	6,5 / 17,0
		Sólidos totais (g/`100g)	12,0 / -

Fonte: Adaptado de BRASIL (2000).

Polpa de fruta é definida como o produto obtido pelo esmagamento ou trituração das partes comestíveis de frutas carnosas, utilizando processos tecnológicos adequados. Para garantir a qualidade, a polpa deve ser preparada a partir de frutas limpas, livres de parasitas e detritos animais ou vegetais, e não deve conter fragmentos das partes não comestíveis da fruta, nem substâncias estranhas à sua composição normal, salvo as exceções previstas pelos órgãos reguladores (BRASIL, 2000; CARVALHO *et al*., 2017).

2.7 Fenômeno de transporte

Fenômenos de Transporte é a ciência que estuda processos físicos nos quais ocorre a transferência de quantidades físicas, como momento, calor e massa, através de diversos meios materiais (sólidos, líquidos ou gasosos). Essa ciência aborda áreas como engenharia química, engenharia de materiais e engenharia de alimentos, envolvendo conhecimentos em Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor e Massa (BIRD *et al.,* 2001; CANEDO, 2010; INCROPERA *et al.*, 2022).

O processo de transporte é caracterizado pela tendência ao equilíbrio, uma condição em que não há variação da grandeza física estudada. Os aspectos comuns a todos os processos de transporte incluem: a força motriz (o movimento em direção ao equilíbrio causado por uma diferença de potencial), o transporte (a transferência de uma quantidade física) e o meio (a massa e a geometria do material que influenciam a velocidade e a direção do processo) (SILVA JUNIOR e SILVA, 2018).

De acordo com Çengel e Cimbala (2007), o conhecimento dos Fenômenos de Transporte é amplamente aplicado em projetos modernos de engenharia, como aspiradores de pó e aeronaves supersônicas. Esses fenômenos, que podem ser descritos por meio de modelos matemáticos, envolvem grandezas físicas e coeficientes de transporte específicos para cada processo.

Nos fenômenos de transporte, o movimento de uma quantidade física é induzido pelo gradiente de outra quantidade, que está sempre relacionada à primeira. O gradiente refere-se à variação espacial da quantidade física. Por exemplo, a principal força motriz para o escoamento de um fluido é o gradiente de pressão; para a transferência de calor, é o gradiente de temperatura; e para a transferência de massa, é o gradiente de concentração (INCROPERA *et al.*, 2022).

O conhecimento da natureza física de cada tipo de transporte permite o desenvolvimento de formulações matemáticas específicas e a resolução dos respectivos problemas (INCROPERA *et al.,* 2022).

2.7.1 Termologia.

A termologia é uma área da física que estuda os fenômenos térmicos presentes na natureza, focando-se na medição da temperatura em diferentes meios físicos. Esse

campo investiga como a temperatura influencia as mudanças estruturais em um corpo (INCROPERA *et al.*, 2022).

A temperatura, nesse contexto, é uma grandeza que reflete a energia cinética média das partículas de um sistema. Quanto maior a agitação molecular, mais elevada será a temperatura do corpo. Em contrapartida, uma menor temperatura corresponde a uma menor agitação das moléculas, resultando em um corpo mais frio. O calor, portanto, pode ser definido como a energia transferida entre dois corpos em função da diferença de temperatura existente entre eles (INCROPERA *et al.,* 2022).

2.7.2 Calor específico

O calor específico é a quantidade de calor necessária para que cada grama de uma substância tenha sua temperatura aumentada em 1°C (INCROPERA *et al.,* 2022). Essa é uma característica intrínseca de cada material, que indica como ele se comporta quando exposto a uma fonte de calor. Por isso, é um parâmetro importante para determinar a quantidade de energia que deve ser adicionada ou removida durante processos de aquecimento e resfriamento (ARAÚJO *et al.,* 2004; MEDEIROS, 2020).

2.8 Transferência de Calor

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 (ATAIDE, 2014; INCROPERA *et al.,* 2022). A transferência de energia térmica ocorre espontaneamente do corpo que apresenta maior temperatura para aquele de menor temperatura. Durante esse processo de troca de energia, podem ocorrer dois tipos de transformações: variação de temperatura ou mudança de estado físico da matéria.

O calor pode ser transferido em sólidos, fluidos ou até mesmo no vácuo, basicamente através de agitação molecular, movimento macroscópico de fluidos, ou emissão de fótons. É comum considerar três formas principais de transporte de calor: condução, convecção e radiação. Na maioria dos casos práticos, a transferência de calor resulta da combinação desses três mecanismos (INCROPERA *et al.,* 2022).

2.8.1 Condução

O processo de condução de calor corresponde à propagação de energia térmica que ocorre predominantemente em meios sólidos, na qual o calor é transferido de partícula para partícula em um meio estacionário. Nesse mecanismo, não há deslocamento macroscópico de matéria; as partículas permanecem vibrando em torno de suas posições de equilíbrio, promovendo a transferência de energia térmica. O transporte de calor ocorre da região de maior temperatura para a de menor temperatura por meio das interações moleculares diretas ou pelo movimento de elétrons livres. Devido ao seu caráter microscópico, considera-se que não há movimento global do meio durante o processo de transferência de calor (INCROPERA *et al*., 2022). A taxa de transferência de calor é representada pela Equação 2.1.

$$\dot{Q} = kA\frac{T_1 - T_2}{L} = -\ kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{2.1}$$

em que:

- $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor;
- k é a condutividade térmica do material;
- A é a área da superfície;
- ΔT é a temperatura das extremidades quente e fria;
- Δx é a espessura.

A Equação diferencial 2.1, conhecida como Lei de Fourier da condução térmica, estabelece que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura. O sinal negativo presente na equação indica que o calor flui espontaneamente no sentido de reduzir a diferença de temperatura, isto é, da região mais quente para a mais fria. Dessa forma, quando a temperatura diminui com o aumento da coordenada espacial, o gradiente térmico torna-se negativo, garantindo coerência física com o sentido natural da transferência de calor. Assim, qualquer método para determinar a condutividade térmica (k), em regime permanente, requer o conhecimento do perfil de temperatura e a quantificação simultânea do fluxo térmico.

Além disso, a condução de calor constitui um processo irreversível, pois ocorre geração positiva de entropia durante a transferência energética. Essa característica está em total concordância com a Segunda Lei da Termodinâmica, segundo a qual processos naturais evoluem espontaneamente no sentido do aumento da entropia do sistema e de sua vizinhança. Portanto, a transferência de calor por condução não apenas reduz gradientes térmicos, mas também representa um mecanismo dissipativo associado à irreversibilidade dos processos térmicos reais.

2.8.2 Convecção

Esse processo de transmissão de calor ocorre em meios fluidos, como líquidos e gases, onde o calor é transferido de uma região para outra com o próprio fluido atuando como agente de transporte. Durante a propagação do calor, a energia térmica se desloca juntamente com o movimento do fluido aquecido. Nesse contexto, o meio está em movimento, e a diferença de temperatura resulta na formação das chamadas correntes de convecção. O termo "convecção" é frequentemente utilizado para se referir ao transporte de calor combinado com a condução (INCROPERA *et al*., 2022). A relação entre a taxa de transferência de calor por convecção e as temperaturas envolvidas pode ser representada pela Equação (2.2), também conhecida como lei de resfriamento de Newton.

$$\dot{Q} = hA(T_x - T_\infty) \tag{2.2}$$

onde:

- $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor por convecção;
- h é o coeficiente de transferência de calor por convecção;
- A é a área da superfície;
- T_x é a temperatura da superfície
- T_∞ é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície;

Apesar da complexidade da transferência de calor por convecção, a Equação (2.2) mostras que a taxa de transferência de calor é proporcional à diferença de temperatura.

2.8.3 Radiação

O processo de propagação de calor na forma de ondas eletromagnéticas, conhecido como radiação, não requer contato direto entre os corpos. Este é o único tipo de transmissão de calor que pode ocorrer no vácuo. A transferência de calor por radiação geralmente ocorre na faixa do espectro eletromagnético conhecida como infravermelho. Diferentemente da condução e da convecção, a radiação não necessita de um meio material para se propagar, (INCROPERA *et al.,* 2022). Denominada de lei de Stefan-Boltzmann, a taxa de transferência de calor por radiação é expressa pela Equação (2.3).

$$\dot{Q} = A\mathcal{E}\sigma T^4 \tag{2.3}$$

onde:

- $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor na radiação;
- A é a área da superfície emissora;
- $\mathcal{E}$ é a emissividade da superfície;
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann;
- T^4 é a temperatura absoluta da superfície.

2.9 Equação de Transporte

É a equação de conservação, também conhecida como Equação de Transporte apresentada na Equação (2.4). É uma equação diferencial parcial de segunda ordem e na sua forma mais geral pode ser escrita como (CRANK, 1975; BIRD *et al.,* 2001; FARIAS, 2011; ATAÍDE, 2014; COSTA. 2015; MALISKA, 2017; FARIAS *et al*., 2018):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla.\left(\lambda\vec{V}\Phi\right) = \nabla.\left(\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi\right) + S^{\Phi} \tag{2.4}$$

em que:

- Φ é a variável dependente de interesse;
- λ e Γ são coeficientes de transporte;
- $\vec{v}$ é o vetor velocidade do meio;
- S^{Φ} é o termo fonte;
- $\nabla.\left(\lambda\vec{V}\Phi\right)$ são termos advectivos.

- O primeiro termo é conhecido como termo transiente da equação e representa a variação temporal da grandeza de interesse em um volume infinitesimal, no instante t.
- O segundo termo, denominado termo advectivo, indica o quanto a grandeza varia na unidade de tempo devido ao seu movimento junto com o meio. Fornece a variação da grandeza na unidade de tempo em consequência do seu movimento com o meio a uma velocidade $\vec{v}$.
- O terceiro termo (termo difusivo) indica a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão.
- Por fim, o quarto termo (termo fonte) fornece a taxa de geração da grandeza dentro de um volume de controle.

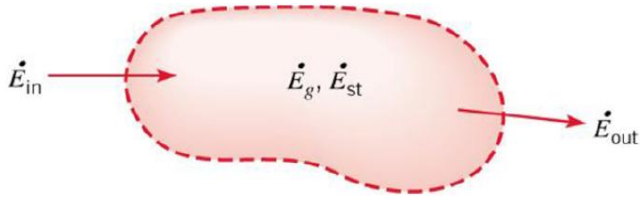
Quando se faz considerações em alguns dos parâmetros da equação de transporte (Equação 2.4), como será visto mais adiante, ela pode ser utilizada para qualquer lei de transporte, como por exemplo, a conservação da massa (continuidade), transporte de movimento (momento linear), transporte de energia, e transporte de massa (SILVA, 2007; FARIAS *et al.,* 2013; ATAÍDE, 2014; COSTA, 2015; MACHADO, 2019; SILVA *et al*., 2019).

2.10 Equação da condução do calor

A equação da condução de calor é uma equação diferencial cuja solução determina a distribuição de temperatura em um meio estacionário. Ela é derivada a

partir do princípio da conservação de energia aplicado a um volume de controle infinitesimal, assumindo que a condução é o único mecanismo de transferência de calor. Para sua formulação, considera-se um volume de controle com uma forma arbitrária mostrada na Figura 2.2.

Figura 2.2: Volume de controle de forma arbitrária.



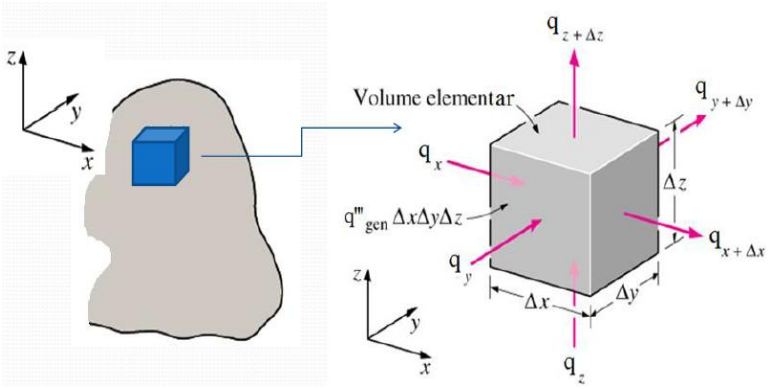
Fonte: Autoria Própria.

onde:

- $\dot{E}_{in;}\ \dot{E}_{out}$: representam transferência de energia térmica por unidade de tempo através da superfície de controle devido a uma diferença de temperatura.
- $\dot{E}_{gen}$: é a geração de energia por unidade de tempo devido á conversão de outra forma de energia (elétrica, nuclear ou química). O processo de conversão de energia ocorre dentro do sistema.
- $\dot{E}_{st}$: é a taxa de variação de energia armazenada no volume de controle ou sistema.

A equação da condução de calor no sistema de coordenadas cartesianas será formulada levando em conta o fluxo de calor através de um volume de controle elementar em estudo, como mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3: Fluxo de calor em um volume elementar em coordenadas cartesianas.



Fonte: Autoria própria.

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:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \tag{2.5}$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \tag{2.6}$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \tag{2.7}$$

Aplicando a conservação da energia no volume de controle diferencial:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \tag{2.8}$$

ou seja;

$$(q_x - q_{x+\Delta x}) + \left(q_y - q_{y+\Delta y}\right) + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \tag{2.9}$$

Aplicando as Equações 2.5, 2.6 e 2.7 na Equação 2.10, resulta:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial q_y}{\partial y} dz - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \tag{2.10}$$

Definindo S^{Φ} como a taxa de energia gerada por unidade de volume, obtém-se.

$$\dot{E}_{gen} = S^{\Phi} dV = S^{\Phi} dx dy dv \tag{2.11}$$

Por outro lado, a variação total de energia $\dot{E}_{st}$, pode ser dado pela Equação (2.12).

$$\dot{E}_{st} = \frac{\partial(mc_pT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho dVc_p) \rightarrow \dot{E}_{st} = \frac{\partial(\rho c_pT)}{\partial t}dxdydv \tag{2.12}$$

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

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x}dx + \frac{\partial q_y}{\partial y}dz - \frac{\partial q_z}{\partial z}dz + S^{\Phi}dxdydZ = \frac{\partial(\rho c_pT)}{\partial t}dxdydZ \tag{2.13}$$

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

$$q = -k\nabla T \tag{2.14}$$

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

$$q_x = -k\frac{\partial T}{\partial x}dydz \tag{2.15}$$

$$q_y = -k\frac{\partial T}{\partial y}dxdy \tag{2.16}$$

$$q_z = -k\frac{\partial T}{\partial z}dxdy \tag{2.17}$$

Substituindo q_x, q_y e q_z na equação de conservação da energia, Equação (2.13), tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial T}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial T}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + S^{\Phi} = \frac{\partial(\rho c_pT)}{\partial t} \tag{2.18}$$

onde:

- $\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ é a transferência líquida de energia

térmica dentro do volume de controle (Entrada-Saída);

- S^{Φ} é a Geração de energia térmica;
- $\frac{\partial\left(\rho c_p T\right)}{\partial t}$ é a Variação de energia interna armazenada.

Agora, identificando "grad T" e o "operador nabla" ∇, como:

$$\nabla \mathrm{T} = \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}\,\vec{\mathrm{i}} + \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}}\,\vec{\mathrm{j}} + \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}}\,\vec{\mathrm{k}} \tag{2.19}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\,\vec{\mathrm{i}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\,\vec{\mathrm{j}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\,\vec{\mathrm{k}} \tag{2.20}$$

Pode-se escrever a equação da condução de calor de forma mais compacta:

$$\frac{\partial(\rho c_p \mathrm{T})}{\partial \mathrm{t}} = \nabla.\,(\mathrm{k}\nabla \mathrm{T}) + S^{\Phi} \tag{2.21}$$

onde

- ρ é a densidade do meio
- c_p é o calor específico à pressão constante
- k é condutividade térmica do meio
- T é a temperatura.

2.11 Equação de difusão

Crank (1975) descreve a difusão como um processo de transporte de uma quantidade conservada, como massa ou calor, que ocorre devido à presença de gradientes de concentração no meio. Esse fenômeno resulta do movimento aleatório das moléculas, conduzindo o fluxo natural de regiões de maior para regiões de menor concentração, sendo formalizado matematicamente pela equação de difusão, que representa a evolução temporal e espacial da concentração da substância, fundamentada na lei de Fick e no princípio da conservação de massa.

Complementando essa abordagem, a difusão pode ser definida como um fenômeno de transporte de matéria, quantidade de movimento ou energia provocado pela existência de um gradiente. Nesse processo, o deslocamento ocorre naturalmente das regiões de maior para as de menor concentração, buscando o equilíbrio do sistema. Esse mecanismo resulta do movimento microscópico das moléculas e constitui um dos principais processos de transporte presentes em sistemas físicos e engenharias térmicas (MACHADO, 2019).

Durante esse processo, o movimento aleatório das partículas, denominado movimento browniano, faz com que elas se desloquem continuamente e se espalhem pelo meio disponível, promovendo uma distribuição mais uniforme ao longo do tempo. Esse fenômeno ocorre de forma espontânea, reduzindo diferenças de concentração e aumentando a desordem do sistema, associada ao aumento da entropia. A difusão pode ocorrer em meios sólidos, líquidos ou gasosos (INCROPERA *et al.*, 2022).

A Lei de Fick descreve o fenômeno da difusão de massa, caracterizado pelo deslocamento de partículas de uma substância de regiões com maior concentração para regiões com menor concentração. Essa lei fundamenta-se na equação de difusão, a qual, por sua vez, é derivada da equação geral de transporte. Estabelece-se, assim, que o fluxo de matéria ocorre em sentido oposto ao gradiente de concentração, sendo, portanto, proporcional a esse gradiente negativo. De forma análoga, a Lei de Fourier refere-se à condução de calor, definindo que o fluxo térmico se propaga no sentido do gradiente negativo de temperatura, isto é, das regiões de maior temperatura para as de menor temperatura. Nessa perspectiva, o fluxo de calor apresenta-se sempre perpendicular às isotermas, que representam as superfícies de temperatura constante.

Se o termo advectivo e o termo fonte forem iguais a zero na equação geral de transporte (Equação 2.4), a variação da grandeza dentro do volume de controle vai ocorrer somente por difusão, e a equação geral passa a ser chamada de equação de difusão, definida pela expressão (SILVA, 2009; INCROPERA, 2022):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla.\left(\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi\right) \tag{2.22}$$

A Equação (2.22) descreve vários fenômenos de transporte, como a difusão de calor e de massa, e uma série de fenômenos correlatos, tais como: resfriamento, aquecimento, congelamento, secagem e osmose.

A equação de transporte difusivo de massa pode ser obtida a partir da equação de difusão se for feito $\lambda = 1$, $\Gamma^{\Phi} = \mathrm{D}$ e $\Phi = \mathrm{M}$. Agora a Equação (2.22) torna-se:

$$\frac{\partial(\mathrm{M})}{\partial \mathrm{t}} = \nabla.\left(\mathrm{D}\nabla\mathrm{M}\right) \tag{2.23}$$

em que,

- M é o teor de umidade dentro do volume de controle no instante t;
- D é a difusividade de massa;
- $\mathrm{D}\nabla\mathrm{M}$ define a taxa de difusão de água por unidade de área.

Algumas considerações também precisam ser feitas na Equação (2.22) para que ela corresponda especificamente à equação de transporte de calor por difusão, também chamada equação da condução de calor. Assim, os parâmetros:

- λ assume o valor correspondente de ρc_p , (produto da densidade pelo calor específico a pressão constante da grandeza em estudo);
- Γ^{Φ} assume a condição de K (a condutividade térmica);
- Φ , genérica, torna-se a temperatura T;

Então, pode-se escrever que:

$$\lambda = \rho \mathrm{c_p} \tag{2.24}$$

$$\Gamma^{\Phi} = \mathrm{K} \tag{2.25}$$

$$\mathrm{S}^{\Phi} = \mathrm{S} \tag{2.26}$$

Substituindo as equações (2.24), (2.25) e (2.26), na Equação (2.21), obtém-se:

$$\frac{\partial(\rho \mathrm{c_p T})}{\partial \mathrm{t}} = \nabla.\left(\mathrm{K}\nabla\mathrm{T}\right) \tag{2.27}$$

Assim, na equação da condução de calor Equação (2.27), a grandeza transportada é a energia interna e a variável dependente é a temperatura. No segundo

membro da Equação (2.27), o termo entre parêntesis é caracterizado pela taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à direção de transferência (fluxo de calor), conhecido por lei de Fourier cuja unidade, no Sistema Internacional, é J/(s m²) ou w/m² (SILVA, 2007; INCROPERA, 2022):

$$\vec{q} = -k\nabla T \tag{2.28}$$

Na Equação (2.27), considerando que a densidade e o calor específico à pressão constante do corpo permanecem constantes, a variação temporal afeta apenas a temperatura do sistema. Assim, o termo que representa a mudança no tempo refere-se exclusivamente à temperatura, permitindo que a equação seja reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla . \left(\frac{K}{\rho c_p} \nabla T \right) \tag{2.29}$$

A difusividade térmica do sistema representada por α, que é igual à razão entre a condutividade térmica do meio e a capacidade que o meio tem de armazenar energia térmica por unidade de volume, pode ser escrita como:

$$\alpha = {K}/{\rho c_p} \tag{2.30}$$

onde:

- α é a difusividade térmica.
- K é a condutividade térmica do meio;
- c_p é capacidade térmica.
- ρ é densidade de massa

A difusividade térmica é a propriedade termofísica que descreve a velocidade com que o calor se distribui no interior de um material, resultante da relação entre sua capacidade de conduzir energia térmica e sua capacidade de armazenar calor. Dessa forma, materiais com maior difusividade térmica apresentam respostas mais rápidas às

variações de temperatura (KREITH e BOHN, 2011; MACHADO, 2019; INCROPERA, 2022).

Dessa forma, podemos reescrever a Equação (2.30) da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} = \nabla . \left(\alpha \, \nabla \mathrm{T}\right) + \mathrm{S} \tag{2.31}$$

A Equação (2.31), pode ser reescrita se considerarmos a condutividade térmica constante, então o operador divergente atuará apenas no gradiente de temperatura do sistema, logo pode ser escrita assim:

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} = \alpha \nabla . \left(\nabla \mathrm{T}\right) + \mathrm{S} \tag{2.32}$$

As Equações (2.31) e (2.32), nas quais aparecem a difusividade térmica α, são conhecidas como equações de difusão transiente de calor. A variável dependente é a temperatura; as variáveis independentes são o tempo e a posição enquanto a grandeza transportada é a energia, na forma de calor. Levando em conta que o divergente do gradiente é o laplaciano da função escalar, logo, pode-se reescrever a Equação (2.33) como:

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} = \alpha \nabla^2 \mathrm{T} + \mathrm{S} \tag{2.33}$$

A maneira mais simples da equação de difusão corresponde ao estado cuja temperatura em cada ponto do sistema não mais varia com o tempo e onde não haja fonte de energia. A Equação (2.33) sinaliza que a taxa de variação da temperatura é igual ao laplaciano da temperatura multiplicada pela difusividade térmica adicionada ao termo fonte. Desta forma, corresponde ao estado estacionário, em que a Equação (2.34) assume a forma da equação de Laplace:

$$\nabla^2 \mathrm{T} = 0 \tag{2.34}$$

2.12 Condições de contorno para solução da equação de difusão

De acordo com Lins (2013), Ataíde (2014), Costa (2015) e Machado (2019), o objetivo principal quando se estuda o processo de transferência de calor por difusão é a obtenção do campo de temperatura T (x, y, z, t) do meio, como resultado da solução da equação diferencial que representa o processo. Assim, para determinar a distribuição de temperatura em um meio, é necessário resolver a forma apropriada da equação de calor. No entanto, tal solução depende das condições físicas existentes nas fronteiras, também chamada de condições de contorno que são utilizadas para especificar a variável dependente nas fronteiras do domínio do problema e, se a situação variar com o tempo, a solução também depende das condições existentes no meio no instante inicial.

Os três tipos de condições de contorno frequentemente usadas para especificar a variável dependente nas fronteiras do domínio do problema, para a obtenção de soluções analíticas e/ou numéricas da equação de difusão são:

- **Condição de contorno de Dirichlet (prescrita ou primeiro tipo).**

Para este tipo de condição de contorno, a distribuição de temperatura na superfície de contorno pode ser conhecida em função do tempo, isto é, $T = T_s(t)$, em que, $T_s(t)$ é a temperatura na superfície de contorno para um dado valor de tempo (ÖZIŞIK, 1990, COSTA 2015; INCROPERA, 2022).

$$T = T_s(t) \quad \text{(temperatura da superfície variável com o tempo)} \tag{2.35}$$

- **Condição de contorno de Neumann (fluxo prescrito ou segundo tipo),**

Esta condição de contorno refere-se a uma situação em que o fluxo térmico na superfície é conhecido. Esse fluxo está relacionado ao gradiente de temperatura na superfície de acordo com a lei de Fourier. Um caso particular dessa condição é a superfície perfeitamente isolada, ou adiabática, onde não há troca de energia térmica entre o sistema e o meio exterior (COSTA 2015; INCROPERA, 2022).

a) $-\mathrm{K}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}|_{\mathrm{s}} = \mathrm{q}_{\mathrm{s}}^{''}(\mathrm{t})$ (fluxo de calor na superficie variavel com o tempo) (2.36)

b) $\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}|_{\mathrm{s}} = 0$ (superficie termicamente isolada ou adiabatica) (2.37)

- **Condição de contorno de Cauchy (convectiva ou terceiro tipo**).

A condição de contorno de terceiro tipo refere-se à situação em que há aquecimento ou esfriamento por convecção na superfície. Essa condição é determinada por meio de um balanço de energia na superfície, levando em consideração o fluxo de calor resultante da convecção. Isto é,

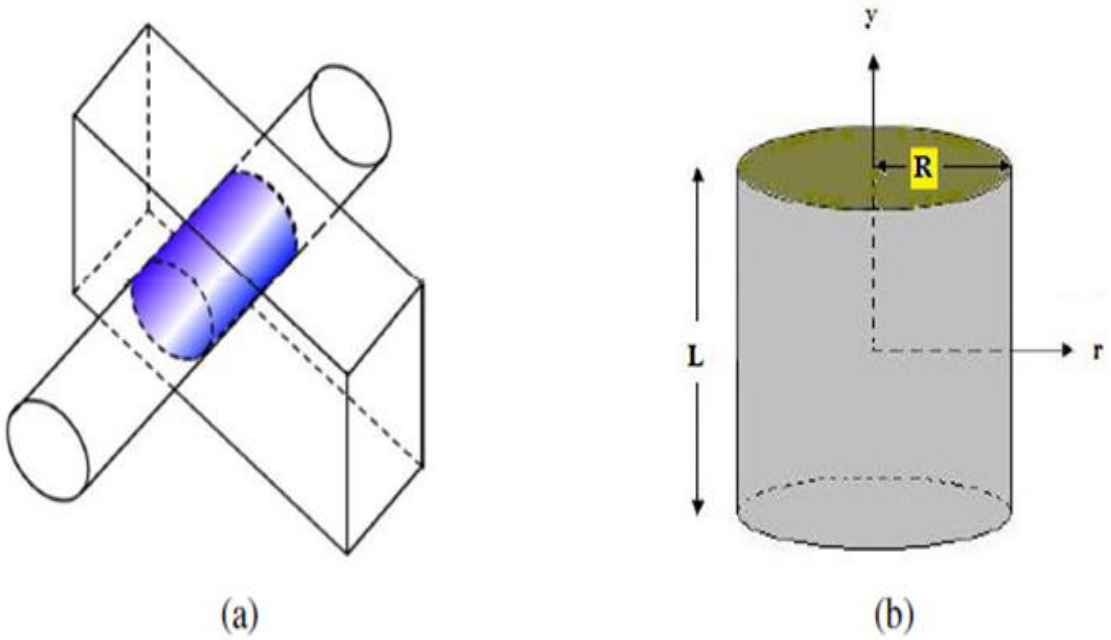
$$\mathrm{h}(\mathrm{T}_{\infty} - \mathrm{T}\big|_{\mathrm{s}}) = -\mathrm{k}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}\bigg|_{\mathrm{s}} \tag{2.38}$$

Em que h é o coeficiente de transferência convectivo, para um fluido ambiente com um determinado balanço do transporte da grandeza $(\mathrm{T}_{\infty} - \mathrm{T}_{\mathrm{S}})$ na fronteira, isto é, deve-se igualar o fluxo por difusão no interior da superfície com o fluxo convectivo que chega nessa mesma superfície, pelo lado externo. Ela descreve de forma mais realista como ocorre a transferência de calor ou de massa na superfície de um corpo, uma vez que, em geral, a grandeza não atinge seu valor de equilíbrio instantaneamente (COSTA 2015; INCROPERA, 2022).

2.13 A geometria do Cilindro finito

As hipóteses anteriores permitem uma solução analítica para diversas formas geométricas simples, como o cilindro finito, que resulta da interseção de um cilindro infinito com uma parede infinita. Em situações em que o fluxo axial é significativo, a adoção da geometria de um cilindro finito é essencial para modelar adequadamente o problema (SILVA, 2012, SILVA JUNIOR e SILVA, 2018).

Figura 2.4: (a) Interseção de uma placa infinita e um cilindro infinito; (b) Cilindro finito de raio R e comprimento L.



Fonte: (COSTA, 2015).

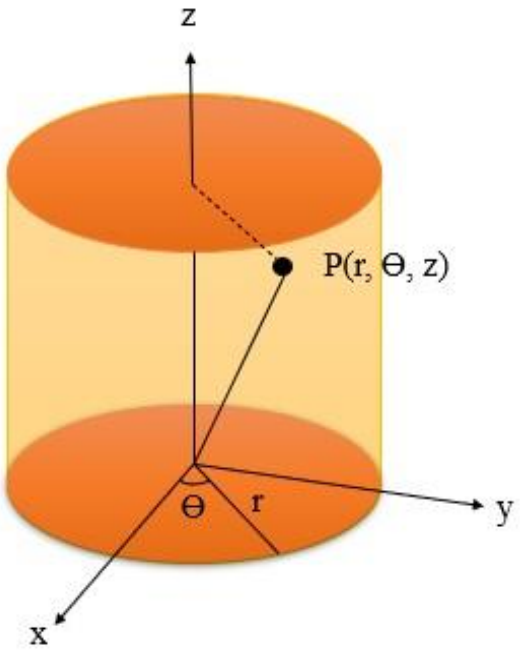
2.14 Equação de difusão em coordenadas cilíndricas

Considere um ponto P em um corpo com geometria cilíndrica, de raio R e comprimento L, como mostrado na Figura 2.5. Esse ponto pode ser descrito tanto no sistema de coordenadas cartesianas quanto em um sistema mais apropriado para a geometria em questão, como o sistema de coordenadas cilíndricas.

A Figura 2.5 ilustra as relações entre as coordenadas cartesianas (x, y, z) e as coordenadas cilíndricas (r, θ, z), representadas pela tríade correspondente. As transformações entre esses sistemas de coordenadas são definidas pelas seguintes relações:

$$x = r\cos\theta; \quad y = r\text{sen}\theta; \; z = z; \; r^2 = x^2 + y^2; \; \theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \tag{2.39}$$

Figura 2.5: Sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas.



Fonte: Autoria própria.

Para desenvolver a equação de forma diferencial, é preciso definir os coeficientes métricos:

$$h_r = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial r}\right)^2} \tag{2.40}$$

$$h_\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \theta}\right)^2} \tag{2.41}$$

$$h_z = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial z}\right)^2} \tag{2.42}$$

No sentido de r, considerando:

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \cos\theta \tag{2.43}$$

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \text{sen}\theta \tag{2.44}$$

$$\frac{\partial z}{\partial r} = 0 \tag{2.45}$$

E substituindo as Equações (2.42), (2.43) e (2.44) em (2.40), tem-se:

$$h_r = \sqrt{\cos^2\theta + \text{sen}^2\theta + 0} \implies h_r = 1 \tag{2.46}$$

No sentido de θ , considerando:

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = -\ r\text{sen}\theta \tag{2.47}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta} = r\cos\theta \tag{2.48}$$

$$\frac{\partial z}{\partial \theta} = 0 \tag{2.49}$$

E substituindo as Equações (2.47), (2.48) e (2.49) na Equação (2.41), tem-se:

$$h_\theta = \sqrt{r^2\text{sen}^2\theta + r^2\cos^2\theta} \implies h_\theta = \sqrt{r^2(\text{sen}^2\theta + \cos^2\theta)} \implies h_\theta = r \tag{2.50}$$

No sentido de z , considerando:

$$\frac{\partial x}{\partial z} = 0 \tag{2.51}$$

$$\frac{\partial y}{\partial z} = 0 \tag{2.52}$$

$$\frac{\partial z}{\partial z} = 1 \tag{2.53}$$

Aplicando as Equações (2.51), (2.52) e (2.53) na (2.42), tem-se:

$$h_z = \sqrt{(0)^2 + (0)^2 + (1)^2} \implies h_z = 1 \tag{2.54}$$

Assim, a equação geral da difusão, na forma genérica, em função de (r, Θ, z), pode ser escrita da seguinte forma:

$$h_r h_\theta h_z = \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r}\left[\left(\frac{h_\theta h_z}{h_r}\right) k \frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial \theta}\left[\left(\frac{h_r h_z}{h_\theta}\right) k \frac{\partial T}{\partial \theta}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\frac{h_r h_\theta}{h_z}\right) k \frac{\partial T}{\partial z}\right] \tag{2.55}$$

Substituindo os coeficientes métricos h_r, h_θ e h_z na equação acima, resulta.

$$1.r.1 = \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r}\left[\left(\frac{r.1}{1}\right) k \frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial \theta}\left[\left(\frac{1.1}{r}\right) k \frac{\partial T}{\partial \theta}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\frac{1.r}{1}\right) k \frac{\partial T}{\partial z}\right] \tag{2.56}$$

Dessa forma, a equação diferencial da transferência de calor em coordenadas cilíndricas, pode ser escrita, como:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\, k \frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left[k \frac{\partial T}{\partial \theta}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[k \frac{\partial T}{\partial z}\right] \tag{2.57}$$

De forma geral, a equação de difusão em coordenadas cilíndricas é dada da seguinte forma (SILVA, 2012; LINS, 2013; ATAIDE, 2014; COSTA, 2015 e SILVA JUNIOR e SILVA, 2018).

$$\frac{\partial(\lambda \Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left[\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\Gamma^\Phi \frac{\partial}{\partial z}\right] \tag{2.58}$$

em que:

- Φ é a variável dependente de interesse no processo difusivo;
- λ e Γ^{Φ} são os parâmetros de processo;
- S é um termo fonte.

2.15 Ferramentas para solução da equação de difusão

Existem dois tipos de ferramentas para resolver uma equação diferencial: as soluções analíticas e as soluções numéricas. As soluções analíticas são soluções exatas da equação, a qual fornece o valor exato da variável de interesse em qualquer ponto e em qualquer tempo. No entanto, para casos mais complexos, como quando se considera a variação dos parâmetros físicos ou a variação das dimensões do material, ainda não existem soluções analíticas. Em casos como este utiliza-se soluções numéricas, as quais permitem uma abordagem mais complexa do problema.

2.16 Ferramentas analíticas

Luikov (1968) e Crank (1975), dentre outros autores, apresentam várias soluções analíticas para equação de difusão considerando algumas geometrias e três condições de contorno: a condição de equilíbrio, de fluxo prescrito e condição convectiva. Em todos os casos considera-se as seguintes hipóteses:

- As dimensões do material não variam durante a difusão de massa;
- A distribuição inicial de Φ deve ser uniforme;
- A difusão é o único mecanismo de transporte dentro do material;
- O material é considerado homogêneo e isotrópico;
- A difusividade efetiva não varia durante a difusão;

2.16.1 Soluções analíticas

Encontrar soluções analíticas para equações diferenciais parciais nem sempre é viável. No entanto, quando tais soluções são obtidas, elas são extremamente valiosas,

pois permitem verificar a precisão das soluções numéricas e podem revelar os parâmetros adimensionais que influenciam a solução do problema físico. Além disso, as soluções analíticas permitem uma análise mais rápida do problema do que as soluções numéricas (MACHADO, 2019).

Com soluções analíticas, é possível determinar a variável de interesse em qualquer momento e em qualquer ponto do domínio. Para isso, é necessário fazer algumas simplificações, como: considerar uma geometria simples, um meio homogêneo e isotrópico, e a difusividade constante, conforme a complexidade da análise desejada.

Existem diversos métodos para obter a solução analítica da equação de difusão. Entre eles, podemos citar o método e separação de variáveis, o método de Galerkin (com funções de base) e o método da transformada integral (como a transformada de Laplace).

2.17 Solução analítica da equação de difusão para um cilindro finito

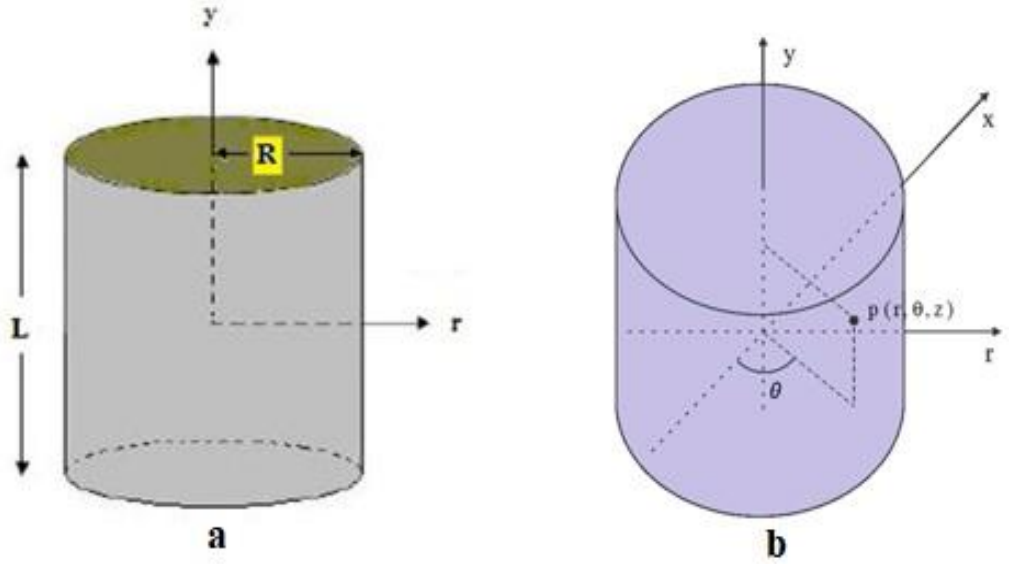
A abordagem analítica da equação de difusão de calor para um cilindro finito permite descrever, com elevada precisão, a distribuição espacial da variável de interesse ao longo da geometria do sistema. Nesse tipo de análise, considera-se a condução de calor em meios contínuos, governada pela equação de difusão, a qual relaciona a variação temporal da temperatura com o gradiente espacial, permitindo a representação do comportamento térmico em função das condições impostas ao sistema.

Assumindo-se a condição de axissimetria, isto é, admitindo que as propriedades físicas do material e o comportamento térmico não variam com o ângulo ao redor do eixo longitudinal do cilindro, a modelagem matemática é significativamente simplificada. Essa hipótese elimina a dependência da variável angular, reduzindo a complexidade do problema sem comprometer a representatividade física do fenômeno em aplicações práticas de engenharia e ciência dos materiais.

Dessa forma, ao considerar um cilindro com simetria axial, a solução da equação de difusão torna-se mais tratável, permitindo a descrição adequada do

processo difusivo em sistemas nos quais tanto o fluxo radial quanto o fluxo axial desempenham papel relevante na evolução da distribuição de temperatura. A seguir, apresenta-se a solução da equação de difusão de calor para um cilindro finito de raio R e comprimento L, conforme ilustrado na Figura 2.6(a).

Figura 2.6: Cilindro finito.



Fonte: (COSTA, 2015).

Para o cilindro finito, não se pode desprezar a difusão de calor na direção axial, uma vez que as áreas circulares nas extremidades, πR^2, não são desprezíveis quando comparadas com a área lateral do cilindro, $2\pi RL$. Por essa razão, configura-se uma difusão bidimensional de calor: nas direções radial e axial. Considerando, agora, que não haja difusão na direção θ, nem existência de fonte de calor, e ainda substituindo a coordenada z pela coordenada y, conforme ilustrado na Figura 2.6(a), a Equação (2.59) assume uma forma simplificada, em que o termo fonte é igual a zero, indicando um regime sem geração interna de calor. Dessa forma, a equação resultante descreve o comportamento transiente da temperatura ao longo das direções radial e axial do sistema cilíndrico. Logo, a expressão torna-se:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma^{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\Gamma^{\Phi}\frac{\partial}{\partial y}\right] \tag{2.59}$$

Para transformar a equação geral de difusão numa equação de difusão de calor, a grandeza Φ se torna a temperatura, T, a ser determinada; o parâmetro λ se transforma no produto da densidade do sistema pelo calor específico a pressão constante do mesmo, ρc_p ; Γ^{Φ} se torna a condutividade térmica, k, do sistema em estudo. Desta forma, transforma-se a equação geral de difusão na equação de condução de calor em duas dimensões, com a seguinte Equação (2.60):

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rk\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[k\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right] \tag{2.60}$$

Considerando as propriedades termofisicos ρ e c_p constantes, têm-se $\alpha = k/\rho c_p$, onde α é a difusividade térmica, portanto, a Equação (2.61) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\alpha\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\alpha\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right] \tag{2.61}$$

Caso a difusividade térmica α também possa ser considerada constante, então a Equação (2.62) poderá ser reescrita do seguinte modo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(r\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right] \tag{2.62}$$

A Equação (2.63), descreve o fenômeno da difusão de calor em coordenadas cilíndricas com parâmetros termofisicos constantes, em duas dimensões.

A solução da Equação (2.63) apresentada por Luikov (1968) para o campo de temperatura $T(r, y, t)$, em que o número de Biot é infinito usando o método da separação das variáveis, é dada por,

$$T(r,y,t) = T_{eq} - (T_{eq} - T_o) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m J_o \left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \cos\left(\mu_m \frac{y}{L/2}\right) x \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{R^2} + \frac{\mu_m^2}{(L/2)^2}\right)\right] \alpha t \quad (2.63)$$

em que,

- T_{eq} é a temperatura de equilíbrio;
- T_0 é a temperatura inicial.

E os coeficientes são dados por:

$$A_n = \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} \quad (2.64)$$

$$A_m = (-1)^{m+1} \frac{2}{\mu_n} \quad (2.65)$$

$$\mu_m = (2m-1)\frac{\pi}{2} \quad (2.66)$$

Sendo J_0 e J_1 as funções de Bessel de primeiro tipo de ordem 0 e 1, respectivamente.

Substituindo os valores de A_n e A_m na Equação (2.63) pode-se escrever o campo de temperatura para a condição de contorno do primeiro tipo:

$$T(r,y,t) = T_{eq} - (T_{eq} - T_o) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} (-1)^{m+1} \frac{2}{\mu_m} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \cos\left(\mu_m \frac{y}{L/2}\right) x \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{R^2} + \frac{\mu_m^2}{(L/2)^2}\right)\right] \alpha t \quad (2.67)$$

As raízes μ_n , serão obtidas através da equação característica:

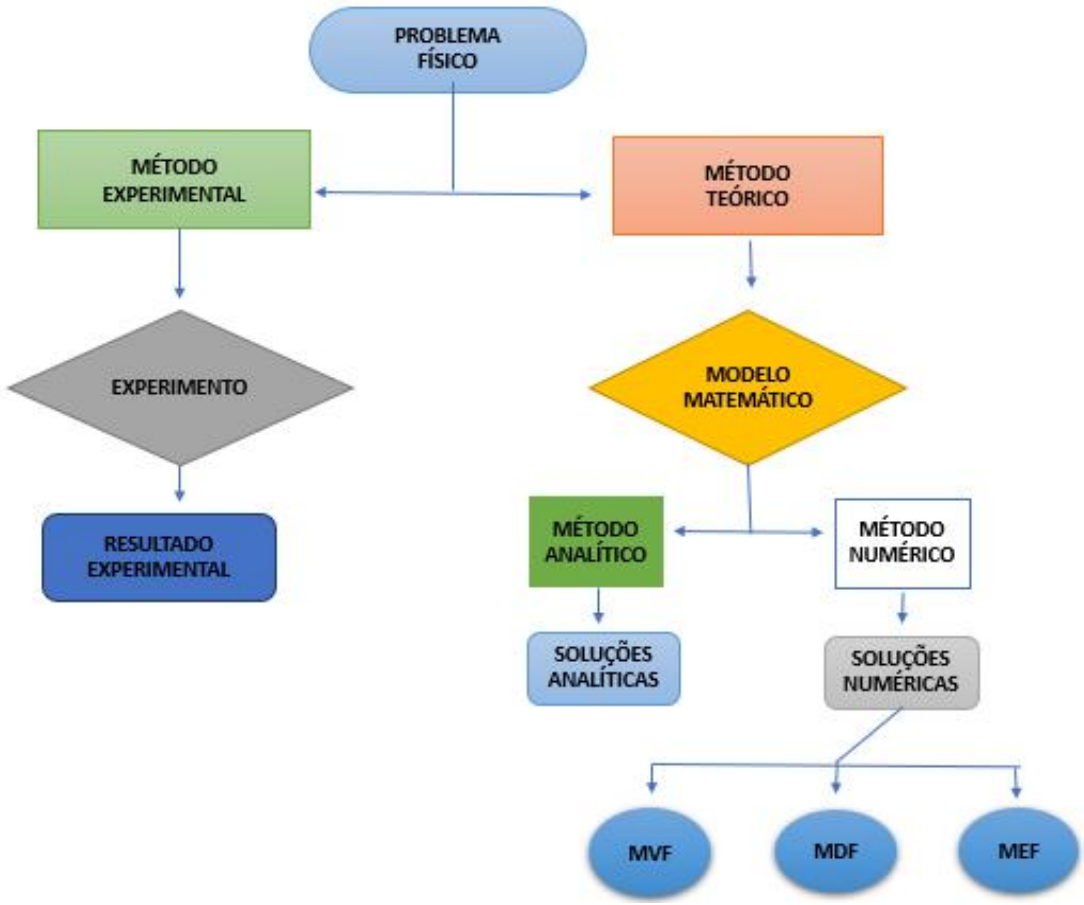
$$J_0(\mu_n) = 0 \quad (2.68)$$

2.17.1 Soluções Numéricas

Quando se resolve um sistema de equações diferenciais usando um método analítico, obtém-se uma solução explícita, o que possibilita calcular os valores das variáveis para um número infinito de pontos. Por outro lado, o método numérico adota a discretização das equações, substituindo as derivadas parciais por expressões algébricas que envolvem principalmente operações aritméticas com a função incógnita. Isso resulta em um sistema de equações algébricas cujas variáveis representam os valores das grandezas de interesse. Esse sistema pode ser então resolvido por métodos iterativos adequados ao problema específico.

Um fluxograma para descrever os métodos para solução da equação. de difusão pode ser observado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Métodos para solução de problemas da equação de difusão.



Fonte: Autoria própria.

Problemas complexos, que apresentam um grande número de incógnitas e equações, e especialmente aqueles que geram sistemas de equações diferenciais

parciais ou ordinárias, geralmente requerem soluções computacionais. Nesses casos, são aplicadas técnicas numéricas apropriadas para obter a solução desejada (PATANKAR, 1980).

A seleção do modelo matemático representa a etapa inicial na aplicação de métodos numéricos e é essencial para a formulação de soluções aproximadas a um determinado conjunto de equações. De maneira geral, três métodos são amplamente utilizados na resolução numérica de equações diferenciais:

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

A descrição detalhada de cada um desses métodos será apresentada adiante.

2.18 Formulações para os métodos numéricos

A interpolação de dados é uma técnica que visa criar e projetar novos conjuntos de informações com base em dados pontuais provenientes de uma amostragem consistente. De acordo com Maliska (2017), existem três possíveis funções de interpolação ao longo do tempo. Essas funções são úteis quando é necessário considerar intervalos de tempo mais amplos e, ao mesmo tempo, capturar com precisão os transientes. Elas podem ser descritas pela seguinte função de interpolação (SILVA, 2009; MALISKA, 2017):

$$\Phi^{\theta} = \theta^{\Phi} + (1 - \theta)\Phi^{0} \tag{2.69}$$

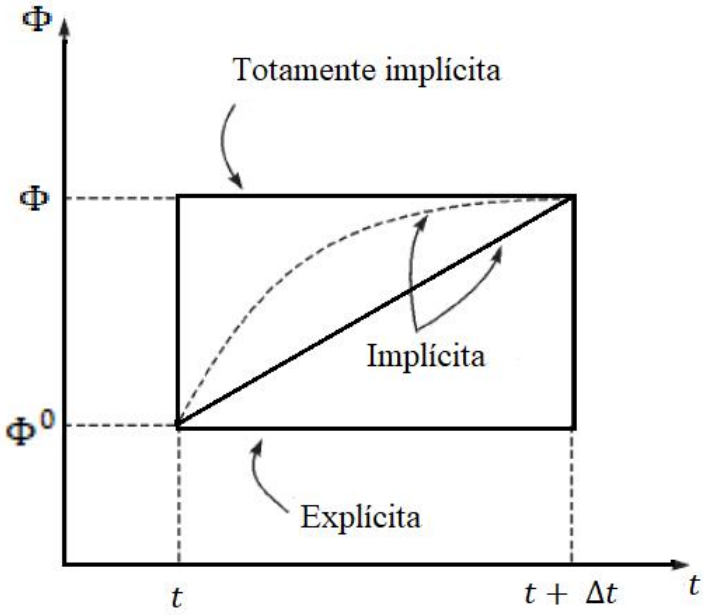
onde:

- θ é o fator peso da média ponderada;
- Φ^{θ} é o valor representativo da grandeza para todo intervalo.

Essas funções resultam em três formulações principais que podem ser usadas em métodos numéricos para resolver a equação de difusão. A seleção do método apropriado depende do intervalo de tempo utilizado para representar a variável de interesse e para a formulação das derivadas parciais que descrevem o fenômeno físico analisado.

Através da Equação (2.69) obtém-se os três tipos de formulações sugeridas e são apresentadas na Figura 2.8. Assim:

Figura 2.8: Função de interpolação no tempo.



Fonte: MALISKA, 2017.

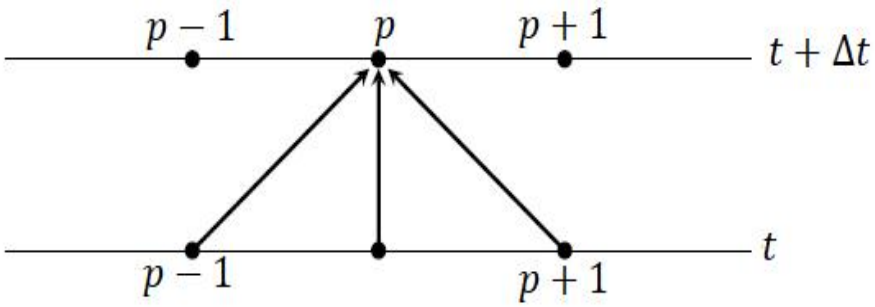
$\theta = 0$, (fomulação explicíta) (2.69)

$0 < \theta < 1$, (formulação implicíta) (2.69)

$\theta = 1$ (formulação totalmente implicíta) (2.69)

Na Equação (2.69), quando $\theta = 0$, teremos formulação explícita, apresentada na Figura (2.9).

Figura 2.9: Formulação explícita.

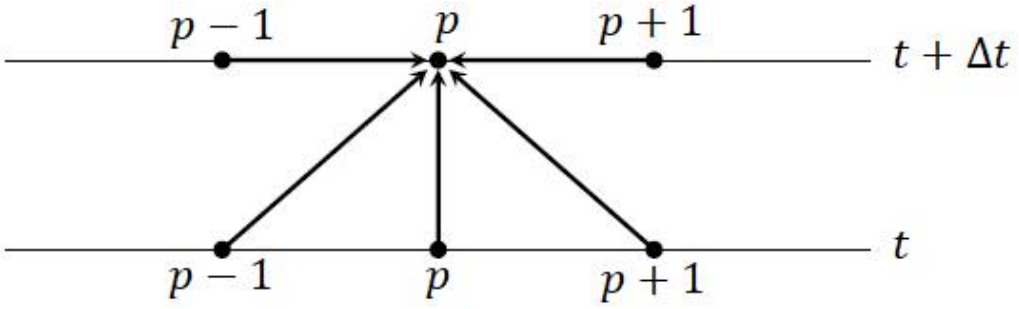


Fonte: Adaptado de MALISKA (2017).

A formulação explicita significa que a variável de interesse para as derivadas espaciais é calculada no instante inicial (t) do intervalo de tempo (Δt) e, portanto, o seu valor já é conhecido ($\Phi^{\theta} = \Phi^{0}$). Nesse caso, a discretização gera um conjunto de equações independentes, que podem ser resolvidas separadamente para encontrar a temperatura em cada ponto do espaço para o novo intervalo de tempo. Dessa forma, a variável de interesse para cada volume de controle pode ser determinada para o nível de tempo imediatamente posterior (t + Δt), e, consequentemente, sem que seja necessário resolver um sistema de equações. Uma desvantagem dessa formulação é que ela tem uma limitação em relação à magnitude do intervalo de tempo que deve ser adotado para avançar no tempo, de forma que seja mantida a estabilidade da solução numérica (SILVA, 2009; COSTA, 2015, MALISKA, 2017, MACHADO, 2019).

Para a formulação implícita, mostrada na Figura 2.10, o mais conhecido método nessa classe é o de (Crank-Nicolson), onde $0 < \theta < 1$, a variável de interesse Φ, que define as derivadas espaciais é uma média ponderada dos valores de Φ no início e no fim do intervalo de tempo (SILVA, 2009; LINS, 2013; MALISKA, 2017).

Figura 2.10: Formulação Implícita.

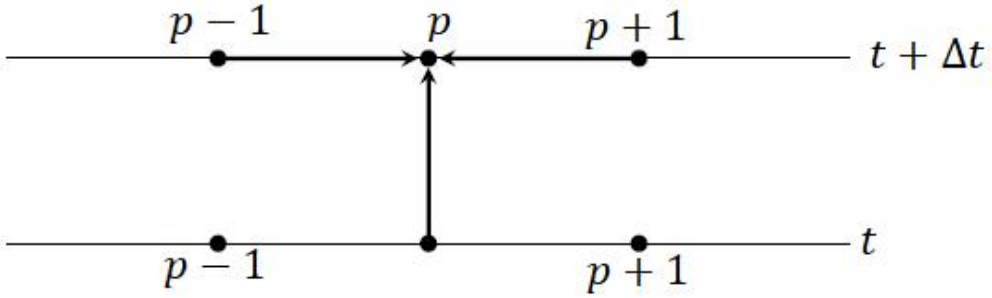


Fonte: Adaptado de MALISKA (2017).

Em termos mais simples, nesta formulação, os valores das temperaturas usados para calcular o fluxo difusivo são obtidos como uma média das temperaturas no início e no final do intervalo de tempo. A variável de interesse é avaliada em um ponto intermediário dentro desse intervalo. Essa abordagem, que combina características das formulações implícita e explícita, resulta em maior custo computacional e demanda mais memória, devido à sua complexidade (SILVA, 2009; MALISKA, 2017; MACHADO, 2019).

Uma formulação é dita totalmente implícita, quando $\theta = 1$, a qual é apresentado na Figura 2.11, sendo incondicionalmente estável para qualquer intervalo de tempo estipulado e pode ser usada em sistemas de equações de grande porte (SILVA, 2009; MALISKA, 2017). A variável de interesse é definida nas derivadas espaciais, no final do intervalo de tempo, no instante (t + Δt), o que caracteriza o acoplamento das equações. Para cada intervalo de tempo há um sistema de equações para serem resolvidas. A vantagem da formulação totalmente implícita está na sua estabilidade qualquer que seja o intervalo de tempo estipulado. Desta forma, é possível estabelecer intervalos de tempo cada vez maiores sem que haja um limite superior.

Figura 2.11: Formulação totalmente implícita.



Fonte: Adaptado de MALISKA (2017).

2.19 Métodos numéricos na solução de problemas difusivo.

Métodos numéricos são técnicas matemáticas usadas para resolver problemas complexos que não têm soluções analíticas diretas. De acordo com Maliska (2017), há três métodos numéricos tradicionais para a resolução de equações diferenciais.

1° Método das diferenças finitas (MDF) - O método das diferenças finitas é uma das abordagens mais tradicionais para resolver equações diferenciais. Esse método se fundamenta na substituição de derivadas por diferenças finitas, que são calculadas usando expansões em série de Taylor ou aproximações polinomiais (MELO, 2020). Segundo Maliska (2017), a técnica de diferenças finitas transforma o operador diferencial em um correspondente numérico.

2° Método dos elementos finitos (MEF) - É um método numérico adequado para tratar problemas com geometrias complexas. A ideia central do MEF é discretizar o domínio, representando-o de forma aproximada por um número finito de elementos com comportamento bem definido. A partir disso, calcula-se o comportamento de cada elemento individualmente e, em seguida, realiza-se a união de todas as soluções aproximadas para obter o resultado do comportamento total. Existem vários métodos para definir como o erro será minimizado. Tanto o MDF quanto o MEF não trabalham com volumes de controle, mas com pontos da malha e, consequentemente, em nível discreto (SILVA, 2009; COSTA, 2015; MALISKA 2017).

3° Método dos volumes finitos (MVF) - Consiste em dividir o domínio físico em estudo em um número finito de subdomínios de volumes elementares denominados volumes de controle, que satisfazem a conservação da propriedade em questão dentro desses volumes elementares. A discretização é feita integrando todos os termos da equação que governa o fenômeno sobre cada volume de controle, no espaço e no tempo. Esse método é baseado na observação de Euler e assume que o material flui através de um volume de controle fixo. Portanto, o MVF é um método para estimar a variação de uma quantidade física armazenada em um espaço com base na diferença entre a quantidade de entrada e a de saída desse espaço (SOUZA, 2022).

Desse modo, realiza-se a discretização do domínio contínuo em pequenos volumes de controle, de forma que exista um volume em torno de cada ponto da malha (SILVA, 2009). As equações de balanço são aplicadas a cada um desses pontos, com as variáveis sendo calculadas e armazenadas nos nós ou no centro do volume (MELO, 2020). A partir dos valores calculados nos volumes de controle, obtém-se uma solução que é transportada para o restante do domínio (SOUZA, 2022). A solução resultante implica que a conservação da grandeza de interesse é satisfeita em qualquer volume de

controle e, consequentemente, em todo o domínio físico estudado (FARIAS, 2011; COSTA, 2015; FARIAS *et al*, 2018; MALISKA, 2022).

Neste contexto, conhecendo as limitações dos diferentes sistemas de coordenadas para descrever diversas geometrias, o presente trabalho utilizou uma solução numérica da equação de difusão de calor em coordenadas cilíndricas, discretizada pelo método de volumes finitos em sua formulação totalmente implícita, com condições de contorno variáveis de Dirichlet (primeiro tipo). As soluções serão utilizadas na descrição da penetração de calor na polpa de graviola (*Annona muricata*), com o objetivo de determinar o parâmetro termofísica da difusividade térmica em função da temperatura local, relativo ao produto em análise, sendo verificados por meio da comparação dos resultados com soluções analíticas e com um programa computacional desenvolvido para este trabalho.

2.20 Trabalhos que utilizam com soluções numéricas para a Equação de difusão

Na literatura, foram investigados vários estudos que aplicaram soluções numéricas para desenvolver a equação de difusão.

Lins (2013) realizou um estudo tanto analítico quanto numérico das propriedades termo-físicas durante a transferência de calor em produtos cilíndricos. O autor resolveu a equação de difusão com condição de contorno do primeiro tipo para investigar a difusão transiente de calor em alimentos pastosos, como agar gel, purê de tomate e creme custard, contidos em recipientes cilíndricos. Ele desenvolveu ferramentas analíticas para descrever a difusão de calor, que foram validadas através de dados de simulações numéricas realizadas para cilindros infinitos e finitos. Os resultados mostraram que o método numérico foi mais eficiente na descrição do processo de difusão de calor comparado ao método analítico. Essa eficácia é atribuída à capacidade do método numérico de lidar com a variabilidade da difusividade térmica em função da temperatura local. Além disso, as medições da difusividade térmica para o agar gel, purê de tomate e creme custard corroboraram com os dados existentes na literatura.

Ataíde (2014) desenvolveu a discretização e a resolução numérica da equação de difusão em coordenadas generalizadas, utilizando o método dos volumes finitos, com o objetivo de simular a transferência de calor durante a pasteurização de alimentos

pastosos acondicionados em recipientes com diferentes formas geométricas, obtidas por revolução de áreas planas. O estudo considerou a variação da difusividade térmica em função da temperatura local, apresentando resultados consistentes com dados da literatura. As análises físico-químicas e microbiológicas demonstraram que os produtos acondicionados em recipientes modificados mantiveram a qualidade esperada. As simulações permitiram estimar com precisão o tempo necessário para que todo o produto atingisse a temperatura de inativação dos agentes patogênicos, sem a necessidade de experimentos físicos, representando, assim, uma vantagem prática e econômica. A metodologia proposta também possibilitou identificar o ponto de maior atraso térmico no interior do produto, permitindo o acompanhamento específico da cinética de aquecimento nessa região crítica, o que contribui para o controle do processo e para a segurança microbiológica. A principal contribuição científica do trabalho consiste na aplicação eficiente de métodos numéricos em sistemas com geometrias complexas, oferecendo à indústria alimentícia uma ferramenta confiável para o projeto e a otimização de embalagens e processos térmicos, com foco na redução de custos e no aumento da eficiência operacional.

Silva Junior (2015) desenvolveu ferramentas numéricas e computacionais para modelar processos de difusão em sólidos com formas cilíndricas. Para isso, a equação de difusão foi discretizada usando o método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita, considerando tanto o caso de um cilindro infinito quanto o de um cilindro finito, e assumindo uma condição de contorno do terceiro tipo. Utilizando dados experimentais de desidratação osmótica de banana (cortada em pedaços de 10 mm), realizados a 40 e 70 ºC e com concentrações de 40 e 60 Brix, foram feitas otimizações para obter expressões que descrevem as difusividades efetivas de água e sacarose, além de determinar o coeficiente de transferência convectiva de massa. Os resultados obtidos para as difusividades de água e sacarose foram compatíveis com os valores encontrados na literatura. A partir dos dados da secagem complementar das amostras osmoticamente desidratadas, os valores para a difusividade de água também estavam de acordo com a literatura. As otimizações concluíram que as altas concentrações durante a desidratação osmótica influenciam a condição de contorno da secagem complementar.

Silva Júnior *et al.,* (2015), estudaram o efeito da concentração de sal no processo de desidratação osmótica de vagem, que corresponde ao invólucro do fruto que protege as sementes. Foram feitas simulações de transferência de massa em

soluções de NaCl a 20 e 26 % e 50º C. Para essas simulações foi usado um modelo de difusão que considerou a difusividade térmica como sendo constante, a geometria usada foi a de um cilindro infinito e uma condição de contorno de terceiro tipo (convectiva). A solução numérica encontrada foi acoplada a um otimizador com o objetivo de se obter os parâmetros do processo via dados experimentais. De acordo com os autores, os resultados encontrados estão de acordo com os valores disponíveis na literatura, para os quais foram usadas ferramentas analíticas na descrição dos processos.

Costa (2015) analisou a transferência de calor em polpa de jaca acondicionada em recipientes cilíndricos. O estudo ofereceu uma solução para a equação de difusão com uma condição de contorno variável do primeiro tipo. Foi desenvolvida uma modelagem físico-matemática para tratar o problema da difusão de calor bidimensional dentro de um recipiente cilíndrico contendo polpa de jaca. Para isso, foram criados dois *softwares* em Fortran: um destinado à estimação da difusividade térmica com base no qui-quadrado e outro para resolver o problema direto. Além disso, foi utilizado um sistema experimental para conduzir a análise inversa (problema inverso). No problema direto, um modelo bidimensional de condução de calor com simetria radial e axial foi aplicado para obter a resposta transiente das temperaturas medidas no centro e na superfície do cilindro. Os resultados obtidos foram consistentes com os dados da literatura, confirmando a eficácia do *software* desenvolvido e sua aplicabilidade em outras simulações. A solução proposta também demonstrou ser eficiente no tratamento térmico da polpa de jaca em recipientes cilíndricos, garantindo segurança alimentar com um custo energético menor.

Silva *et al.* (2018) investigaram a difusividade térmica da polpa de mamão armazenada em recipiente metálico com geometria arbitrária, determinada por meio de otimização a partir de dados experimentais, com o objetivo de prever o comportamento térmico durante a pasteurização. A condução de calor foi modelada pela equação de difusão em coordenadas generalizadas, resolvida numericamente pelo método dos volumes finitos com formulação totalmente implícita. As medições de temperatura foram realizadas nos pontos de maior atraso térmico por meio de termopares, possibilitando a determinação da difusividade térmica como função da temperatura local. As simulações numéricas permitiram estimar o tempo mínimo para que a polpa atingisse o equilíbrio térmico na temperatura de pasteurização em recipientes com diferentes geometrias, eliminando a necessidade de novos experimentos. Os resultados

microbiológicos demonstraram redução significativa de micro-organismos, confirmando a eficácia do processo e evidenciando a contribuição do modelo proposto para o controle térmico e otimização de processos industriais de alimentos. Conclui-se que o método desenvolvido proporciona maior confiabilidade nos parâmetros de processamento térmico, reduz custos operacionais e possibilita o desenvolvimento de embalagens com formatos inovadores, sem comprometer a segurança e a qualidade do produto.

Farias *et al*. (2018) desenvolveu uma solução numérica para a equação de difusão tridimensional em regime transiente, aplicável a um domínio arbitrário. Para isso, a equação foi discretizada em coordenadas generalizadas usando o método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita. O código foi criado em FORTRAN, utilizando o Visual Fortran 6.6.0 na plataforma Windows Vista. Este código foi empregado para simular a secagem de telhas cerâmicas, com base em dados experimentais. A validação da solução proposta foi realizada comparando-a com soluções analíticas e numéricas da equação de difusão para diferentes geometrias, confirmando a precisão das soluções tanto para malhas ortogonais quanto para não-ortogonais.

Machado (2019), analisou o fenômeno de difusão transiente de calor em polpa de manga da variedade (Tommy Atkins) acondicionada em recipiente de geometria elíptica, considerando condição de contorno do primeiro tipo e a difusividade térmica como função da temperatura local. Foram realizadas quatro pasteurizações, com monitoramento da temperatura por meio de termopares instalados na superfície e no centro do produto, registradas em intervalos de um segundo pelo *software* Data Logger. Os dados experimentais foram utilizados em simulações numéricas com código desenvolvido em FORTRAN, acoplado a um otimizador, aplicando o método dos volumes finitos para a solução da equação de difusão em coordenadas tridimensionais. As análises físico-químicas e microbiológicas indicaram que a pasteurização foi eficaz na redução de micro-organismos patogênicos, preservando as propriedades nutricionais da polpa. Os resultados demonstraram que a modelagem com difusividade térmica variável permite prever com precisão o tempo necessário para o equilíbrio térmico do produto, eliminando a necessidade de novos experimentos para diferentes recipientes. Conclui-se que o método proposto contribui para o aprimoramento dos processos industriais de pasteurização, promovendo maior segurança alimentar e redução de

custos experimentais, além de fornecer uma ferramenta confiável para o controle térmico de alimentos em geometrias não convencionais.

Foram realizadas pesquisas em bases de dados acadêmicas nacionais e internacionais, com o objetivo de localizar trabalhos que utilizassem soluções numéricas aplicadas à polpa de graviola. Entretanto, não foram encontrados estudos que abordassem a condição de contorno variável. O único pesquisador encontrado na literatura pesquisada que utilizou essa condição de contorno em seu trabalho foi Costa (2015). A escassez de publicações específicas indica uma lacuna na literatura científica sobre o tema, reforçando a originalidade e a relevância da pesquisa. Foram realizadas buscas em artigos, dissertações e teses, sem que fossem encontrados estudos relacionados. Por isso, torna-se necessária a investigação da aplicação de métodos numéricos nesse contexto. Dessa forma, a presente pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento científico na área.

3 CAPÍTULO: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os modelos matemáticos necessários para desenvolver as ferramentas que foram utilizadas na otimização e simulação da transferência de calor durante o tratamento térmico de produtos alimentares no estado pastoso, acondicionados em recipientes cilíndricos de vidro. O produto adota a geometria do recipiente, o que define o sistema de coordenadas apropriado para descrever a transferência de calor por condução: as coordenadas cilíndricas.

PARTE A – MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 Ferramentas numéricas

Este trabalho propõe considerar hipóteses que aprimorem a compreensão da complexidade do problema de transferência de calor, incluindo a variação da difusividade térmica para condição de contorno de primeiro tipo variável. Como as soluções analíticas disponíveis geralmente não contemplam essas variáveis, será necessário utilizar métodos numéricos para obter resultados mais precisos.

Nesta seção serão apresentados o método numérico empregado para a discretização da equação de difusão, a formulação adotada e as discretizações específicas para o caso do cilindro finito.

3.1.1 Cilindro finito: solução numérica da equação de difusão

Quando a equação de difusão é resolvida analiticamente, uma solução exata é obtida. Isto é uma vantagem com relação à solução numérica. Mas, soluções analíticas são obtidas apenas para situações especiais, muitas vezes pouco realistas, o que geralmente distorce a situação física envolvida. Como uma solução analítica em geral é apresentada na forma de uma série infinita, para que os resultados sejam extraídos, ela deve ser truncada, usando-se apenas um determinado número de termos (LUIKOV,

1968; CRANK, 1975; SILVA, 2012; FARIAS *et al.*, 2018). Dessa forma, a solução analítica perde uma de suas vantagens, pois passa a ter uma solução aproximada, ao invés da solução exata. Já a solução numérica da equação de difusão possibilita aproximar o modelo objeto de estudo para as condições físicas mais próximas da situação real. Por exemplo, pode-se eliminar restrições com relação às propriedades termofisicos e às dimensões do sólido, além da eliminação de restrições com relação à geometria.

3.1.2 Hipóteses para a obtenção da solução numérica para o cilindro finito

O modelo matemático usado na solução numérica da equação de difusão para descrever a condução de calor no interior do recipiente com forma cilíndrica tem como base as seguintes hipóteses simplificadas:

- O cilindro possui raio R e comprimento L;
- O cilindro é homogêneo e isotrópico;
- A distribuição espacial da grandeza de interesse dentro do cilindro é inicialmente uniforme e possui simetrias radial e axial em relação aos eixos centrais;
- O único mecanismo de transporte de calor dentro do cilindro é a condução;
- O raio e o comprimento do cilindro não variam durante a condução;
- Os parâmetros do processo podem variar durante o processo;
- A condição de contorno é do primeiro tipo variável;
- Durante o processo não há mudança de fase do produto.

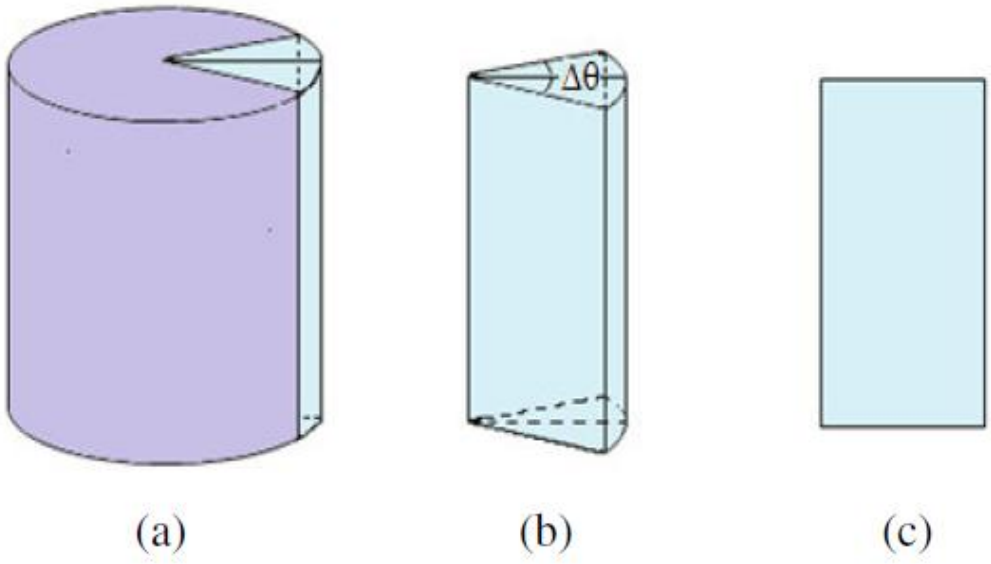
3.1.3 Solução numérica da equação de difusão: geometria cilíndrica

A equação de difusão para o cilindro finito foi resolvida através do método numérico dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita. Tal formulação foi escolhida porque a solução obtida é incondicionalmente estável para qualquer intervalo de tempo. Detalhes sobre o método numérico dos volumes finitos e

suas formulações podem ser encontrados, por exemplo, em (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2017).

Na Figura 3.1 são apresentados: (a) o cilindro finito; (b) uma fatia simétrica deste cilindro na qual os volumes de controle serão definidos e (c) o retângulo onde serão definidos os elementos da malha.

Figura 3.1: (a) Cilindro finito e uma fatia simétrica; (b) Fatia simétrica do cilindro definida pelo ângulo $\Delta\theta$; (c) Retângulo onde serão definidos os volumes de controle. Retângulo obtido com as hipóteses de simetria.



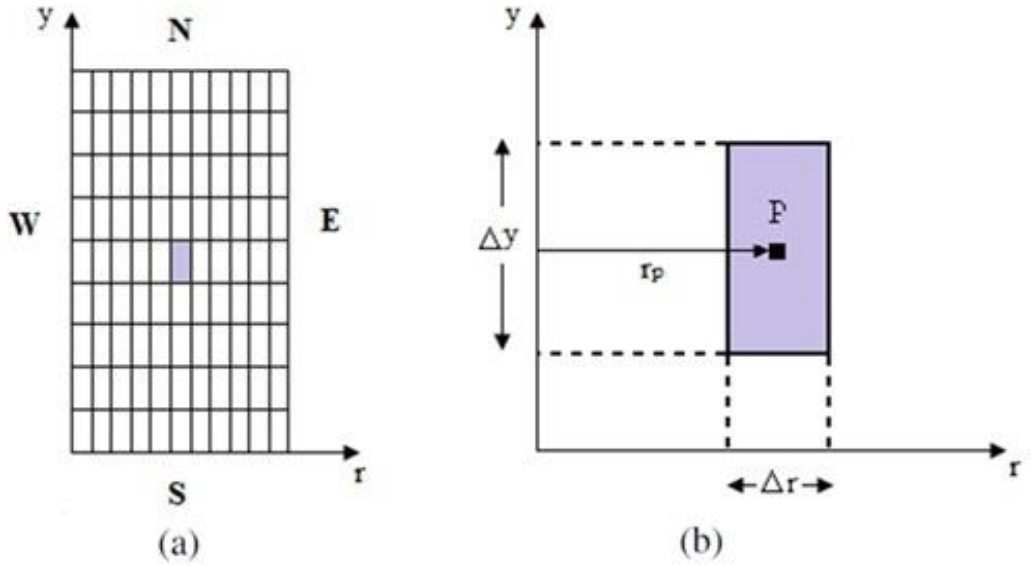
Fonte: COSTA, 2015.

Devido à simetria radial do problema, pode-se considerar apenas a fatia representativa do domínio, conforme ilustrado na Figura 3.1(b), para a resolução da equação de difusão. Essa simplificação é possível porque, nesse tipo de geometria, as propriedades do sistema não variam em relação à coordenada angular, permitindo a redução do domínio tridimensional para uma representação bidimensional equivalente.

Dessa forma, o domínio físico pode ser reescrito na forma de um retângulo bidimensional, conforme apresentado na Figura 3.1(c), o que viabiliza a discretização do problema por meio de métodos numéricos. Nesse contexto, é construída uma malha bidimensional estruturada, como mostrado na Figura 3.2(a), composta por elementos finitos que permitem a representação aproximada do comportamento da variável de interesse em cada região do domínio.

A Figura 3.2(b) destaca um elemento retangular típico dessa malha, utilizado como base para o processo de discretização. A partir dessa malha bidimensional, pode-se determinar o volume associado a cada elemento da malha, dado por uma expressão geométrica $r_p \Delta\theta \Delta r \Delta y$ que leva em consideração suas dimensões e sua posição em relação ao eixo do cilindro. Nessa expressão, a variável r_p representa a posição do ponto nodal do elemento em relação ao eixo do cilindro, sendo fundamental para garantir a correta representação geométrica e física do domínio discretizado.

Figura 3.2: (a) Malha bidimensional para a solução numérica da equação de difusão no cilindro; (b) destaque de um elemento de malha.



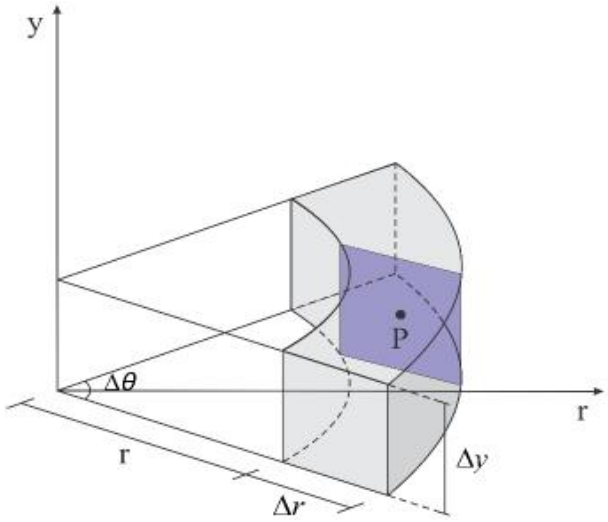
Fonte: COSTA, 2015.

Com base no que foi apresentado, verifica-se que o volume de controle associado a cada elemento da malha bidimensional pode ser representado conforme ilustrado na Figura 3.3. Essa representação evidencia a discretização do domínio em volumes elementares, fundamentais para a aplicação do método numérico na solução da equação de difusão.

A Figura 3.3 apresenta o volume de controle em coordenadas cilíndricas, localizado a uma distância r em relação ao eixo do cilindro. Esse volume é definido considerando sua geometria diferencial, sendo caracterizado por uma espessura radial Δr, altura Δy e largura $r\Delta\theta$. associada à discretização do domínio.

Dessa forma, a formulação em volumes de controle permite uma representação mais precisa do comportamento físico do sistema, uma vez que cada elemento da malha está diretamente relacionado à sua posição no espaço, garantindo a correta consideração da geometria cilíndrica na análise do fenômeno difusivo.

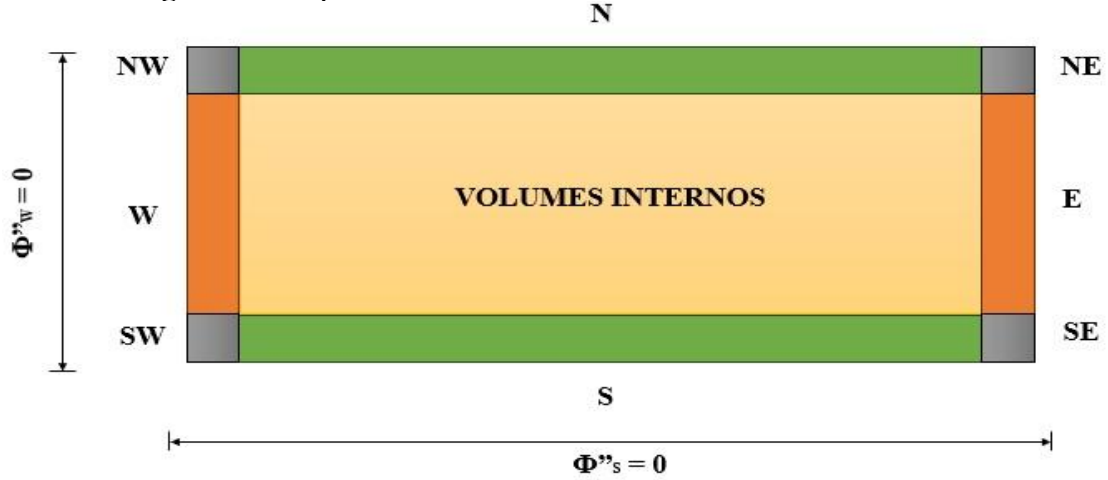
Figura 3.3: Volume de controle para geometria cilíndrica.



Fonte: SILVA JUNIOR, 2015**.**

Da Figura 3.3 pode-se verificar que no domínio bidimensional foi criada uma malha uniforme cujos lados dos elementos retangulares são dados por Δr e Δy . Existem, na malha, nove tipos distintos de volumes de controle, como se pode observar na Figura 3.4.

Figura 3.4: Tipos de volumes de controle da malha bidimensional.



Fonte: Autoria própria.

- **Volumes de controle internos:** Não estão em contato com o meio externo e possuem vizinhos a oeste, a leste, ao norte e ao sul.
- **Volumes de controle ao norte:** Estão em contato com o meio externo ao norte e possuem vizinhos a oeste, a leste e ao sul.
- **Volumes de controle ao sul:** Possuem fluxo zero ao sul e vizinhos a oeste, ao norte e a leste.
- **Volumes de controle a oeste**: Possuem fluxo zero a oeste e vizinhos ao norte, ao sul e a leste.
- **Volumes de controle a leste:** Estão em contato com o meio externo a leste e possuem vizinhos ao sul, ao norte e a oeste.
- **Volume de controle nordeste:** Está em contato com o meio externo ao norte e a leste e possui vizinhos ao sul e a oeste.
- **Volume de controle sudoeste:** Possui fluxo zero ao sul e a oeste, possui vizinhos ao norte e a leste.
- **Volume de controle noroeste:** Possui fluxo zero a oeste, está em contato com o meio externo ao norte e possui vizinhos a leste e ao sul.
- **Volume de controle sudeste:** Possui fluxo zero ao sul, está em contato com o meio externo a leste e possui vizinhos ao norte e a oeste.

A equação de difusão aplicada à geometria de um cilindro finito é dada por:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma^{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)+S \tag{3.1}$$

A Equação apresentada (3.1) foi integrada no espaço $r_p\Delta\theta\,\Delta r\,\Delta y$ e no tempo Δt, utilizando o método dos volumes finitos com formulação totalmente implícita, assumindo uma malha uniforme. Esse procedimento permite determinar de forma precisa como a quantidade de interesse (Φ) varia em cada volume de controle.

$$\int_{t}^{t+\Delta t}\int_{w}^{e}\int_{s}^{n}\frac{\partial(\lambda\partial)}{\partial t}\Delta\theta r_p d_y d_r d_t = \int_{t}^{t+\Delta t}\int_{w}^{e}\int_{s}^{n}\frac{1}{r_p}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma^{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)\Delta\theta r_p d_y d_r d_t + \int_{t}^{t+\Delta t}\int_{w}^{e}\int_{s}^{n}\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)\Delta\theta r_p d_y d_r d_t \tag{3.2}$$

$$+\int_{t}^{t+\Delta t}\int_{w}^{e}\int_{s}^{n} S\,(\Phi)\Delta\theta r_p d_y d_r d_t$$

onde os subscritos “e”, “w”, “s” e “n” significam, respectivamente, as interfaces leste, oeste, sul e norte de um volume de controle considerado, enquanto P é o ponto nodal deste volume. Efetuando as integrações na Equação (3.2), obtém-se:

$$\begin{aligned}\left(\lambda_P\Phi_P-\lambda_P^0\Phi_P^0\right)\Delta\theta\,r_p\,\Delta y\,\Delta r=&\left(r\Gamma^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right|_e-r\,\Gamma^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right|_w\right)\Delta\theta\,r_p\,\Delta y\,\Delta t\\&+\left(\Gamma^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right|_n-\Gamma^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right|_s\right)\Delta\theta\,r_p\,\Delta r\,\Delta t\\&+S(\Phi_P)\Delta\theta\,r_p\,\Delta r\,\Delta y\,\Delta t\end{aligned}\tag{3.3}$$

Neste caso, P corresponde ao ponto nodal do volume de controle em consideração. O sobrescrito zero indica que o termo é avaliado no início do intervalo de tempo, enquanto o termo sem sobrescrito refere-se ao valor avaliado no final desse intervalo. Finalmente, dividindo a Equação (3.3) por $\Delta\theta\,\Delta t$, obtêm-se o seguinte resultado para o volume de controle P:

$$\begin{aligned}\frac{\lambda_P\Phi_P-\lambda_P^0\Phi_P^0}{\Delta t}\,r_p\,\Delta y\,\Delta r=&\left(r_e\Gamma_e^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right|_e-r_w\Gamma_w^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right|_w\right)\Delta y\\&+\left(\Gamma_n^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right|_n-\Gamma_s^{\Phi}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right|_s\right)r_p\,\Delta r\\&+\left(S_c+S_p\Phi_P\right)r_p\,\Delta r\,\Delta y\end{aligned}\tag{3.4}$$

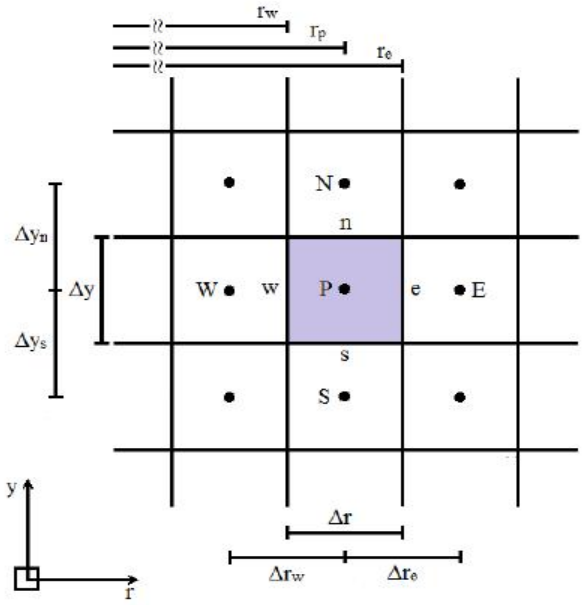
Dessa forma, ao serem realizadas as integrações finais, observa-se que o termo fonte foi escrito em sua forma linearizada. A partir da Equação (3.4), são obtidas as equações discretizadas para os diferentes tipos de volumes de controle.

3.1.4 Discretização da equação de difusão para os volumes de controle internos

Os volumes internos possuem vizinhos a leste, ao norte, ao sul e a oeste e, por conseguinte, não têm contato com o meio externo. Na Figura 3.5 foi destacado um

volume de controle interno de ponto nodal P e seus vizinhos, numa malha bidimensional retangular.

Figura 3.5: Volume de controle interno de ponto nodal P e os volumes de controle vizinhos ao leste (L), ao norte (N) ao sul (S) e a oeste (W).



Fonte: COSTA, 2015.

Da análise da Figura 3.5 pode-se definir as derivadas da Equação (3.4) nas interfaces entre o volume de controle P e seus vizinhos. Para a interface “e”, por exemplo, determina-se a razão da variação da grandeza de interesse em E e P pela distância entre os dois pontos nodais,

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_e \cong \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e} \tag{3.5}$$

De forma semelhante pode-se obter a derivada da grandeza de interesse nas interfaces “w”, “n” e “s”;

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_w \cong \frac{\Phi_p - \Phi_W}{\Delta r_w} \tag{3.6}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_n \cong \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \tag{3.7}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_s \cong \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s}. \tag{3.8}$$

Substituindo as Equações (3.5) a (3.8) na Equação (3.4), tem-se:

$$\lambda_p \Phi_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} - \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} = \left[r_e \Gamma_e^{\Phi} \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r} \right) - r_w \Gamma_w^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r} \right) \right] \Delta y + \left[\Gamma_n^{\Phi} \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \right) - \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \right) \right] r_p \Delta r + (S_C + S_P \Phi_p) r_p \Delta r \Delta y \tag{3.9}$$

A Equação (3.9) corresponde à discretização da equação de difusão para os volumes internos. A partir desta equação pode-se escrever a seguinte equação algébrica (3.10) para um volume de controle interno:

$$A_P \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + B \tag{3.10}$$

em que cada coeficiente corresponde a uma expressão que está descrita a seguir:

$$A_p = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} + r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} - S_p r_p \Delta r \Delta y \tag{3.11}$$

$$A_e = r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e}; \tag{3.12}$$

$$A_w = r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w}; \tag{3.13}$$

$$A_n = r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \tag{3.14}$$

$$A_s = r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} \tag{3.15}$$

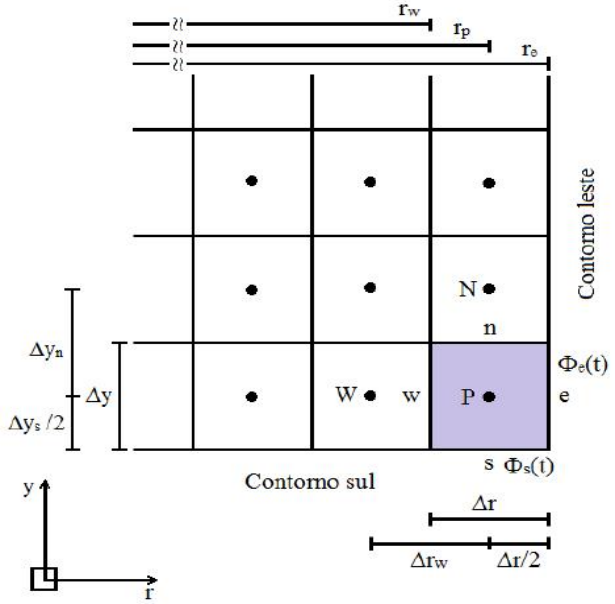
$$B = \lambda_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} \Phi_p^0 + S_c r_p \Delta r \Delta y \tag{3.16}$$

Os coeficientes da Equação (3.10) são representados pelas expressões de (3.11) a (3.16) e correspondem à descrição do fenômeno da transferência de calor entre o volume de controle interno P, mostrado na Figura 3.5 e seus vizinhos a leste, a oeste, a norte e a sul.

3.1.5 Discretização da equação de difusão para o volume de controle sudeste

No contorno sudeste o volume de controle P está em contato com o meio externo a leste e ao sul e com os vizinhos a norte (N) e a oeste (W), como demonstra a Figura 3.6.

Figura 3.6: Volume de controle de ponto nodal P no contorno sudeste.



Fonte: COSTA, 2015.

Aplicando as condições de contorno de Dirichlet ou de primeiro tipo à fronteira sudeste (volume de controle de ponto nodal P) obtém-se as Equações (3.17) e (3.18).

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_e \cong \frac{\Phi_e(t) - \Phi_p}{\frac{\Delta r_e}{2}} \tag{3.17}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_s \cong \frac{\Phi_p - \Phi_s(t)}{\frac{\Delta y_s}{2}} \tag{3.18}$$

Substituindo as Equações (3.17) e (3.18) na Equação (3.4) e fazendo as devidas simplificações, têm-se a Equação (3.19).

$$A_p \Phi_P = A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + B \tag{3.19}$$

onde,

$$A_P = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + 2r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} + r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + 2r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} - S_P r_p \Delta r \Delta y \quad (3.20)$$

$$A_w = r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} \quad (3.21)$$

$$A_n = r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \quad (3.22)$$

$$B = \lambda_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} \Phi_p^0 + 2r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \Phi_e(t) + 2r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} \Phi_s(t) + S_C r_p \Delta r \Delta y \quad (3.23)$$

Nos quais $\Phi_e(t)$ e $\Phi_s(t)$ são os valores da grandeza Φ nas respectivas fronteiras a leste e ao sul, enquanto A_w e A_n são os coeficientes das variáveis de interesse nos pontos nodais dos volumes a oeste e ao norte do volume de controle de ponto nodal P. É importante observar que neste trabalho a condição de contorno não se limita a um valor constante e é expressa através de uma função ou um conjunto de funções em que a variável independente é o tempo de processo.

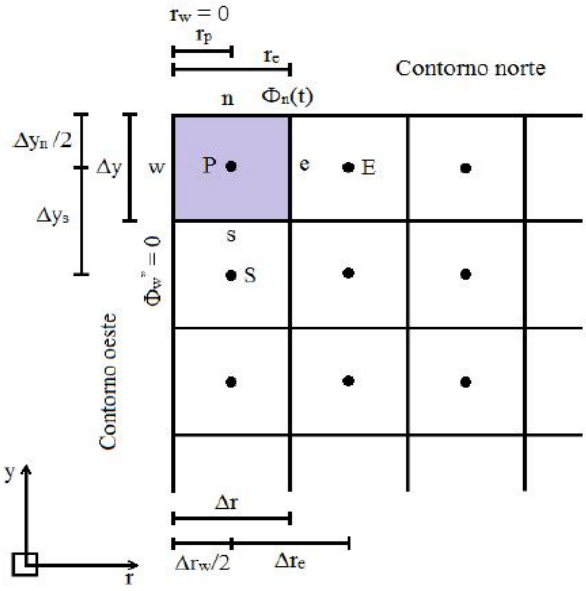
3.1.6 Simetria radial e o volume de controle no contorno noroeste

No contorno noroeste, o volume de controle associado ao ponto nodal P, conforme ilustrado na Figura 3.7, encontra-se em uma região de fronteira do domínio, estando em contato com o centro do cilindro na direção oeste, com o meio exterior na direção norte e com os volumes de controle vizinhos nas direções sul e leste. Essa configuração evidencia a interação simultânea entre o domínio interno e as condições de contorno, sendo relevante para a correta representação do comportamento físico do sistema na formulação numérica.

Nessa região, devido à presença simultânea de fronteiras internas e externas, torna-se necessária uma discretização mais cuidadosa das equações do modelo. As contribuições de calor provenientes dos volumes vizinhos devem ser consideradas de

forma adequada para garantir a continuidade do fluxo térmico. Assim, essa região exerce influência direta na qualidade e na precisão da solução numérica obtida.

Figura 3.7: Volume de controle de ponto nodal P no contorno noroeste.



Fonte: COSTA, 2015.

Devido à simetria do problema, o fluxo radial de calor no eixo central do cilindro é zero para qualquer volume de controle no contorno oeste, que corresponde a

$$r_w \Gamma_w^{\Phi} \left(\frac{\Phi_p - \Phi_w}{\Delta r_w / 2} \right) = 0 \tag{3.24}$$

A interface oeste do volume de controle de ponto nodal P está localizada no eixo central do cilindro, $r = 0$.

A Equação (3.25) representa a condição de contorno ao norte, semelhante a derivada da fronteira leste, na seção 3.1.4, Equação (3.17).

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right|_n = \left(\frac{\Phi_n(t) - \Phi_p}{\Delta y_n / 2} \right) \tag{3.25}$$

Substituindo a Equação (3.25) e atribuindo a simetria radial à interface oeste Equação (3.24) na Equação (3.4) e procedendo de maneira análoga aos casos

desenvolvidos anteriormente, obtém-se a Equação (3.26) para o volume de controle de ponto nodal P que faz fronteira com o eixo de simetria radial e com o meio externo e, localiza-se a noroeste. A Figura 3.7 demonstra esse volume de controle com esta característica.

$$A_p\Phi_P = A_e\Phi_E + A_s\Phi_S + B \tag{3.26}$$

onde,

$$A_P = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + 2 r_P \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} - S_P r_p \Delta r \Delta y \tag{3.27}$$

$$A_s = r_p \, \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} \tag{3.28}$$

$$A_e = r_e \, \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \tag{3.29}$$

$$B = \lambda_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} \Phi_p^0 + 2 r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \Phi_n(t) + S_C r_p \Delta r \Delta y \tag{3.30}$$

Com a simetria radial foi possível simplificar as equações discretizadas da equação de difusão; este recurso diminui o tempo de processamento para a obtenção da solução numérica.

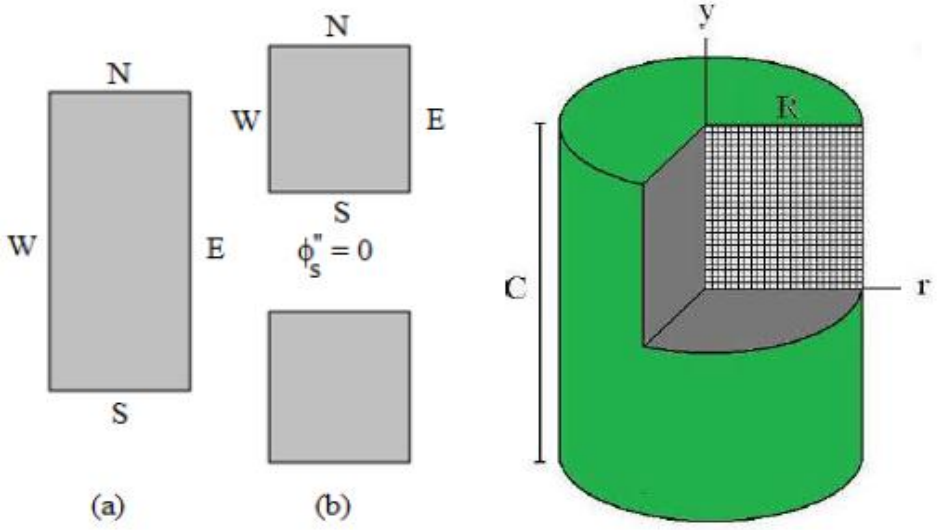
3.1.7 Simetria axial

A simetria axial consiste na invariância das propriedades geométricas e físicas de um sistema em relação a rotações em torno de um eixo longitudinal, comumente denominado eixo central. Essa característica é típica de corpos de revolução, como cilindros, esferas e cones, nos quais as condições de contorno e os parâmetros físicos se mantêm constantes ao longo da rotação. Tal propriedade permite a simplificação de modelos matemáticos, especialmente em equações diferenciais parciais, favorecendo a análise e a resolução de problemas físicos com geometrias complexas.

De modo complementar à simetria axial, a simetria radial em relação ao eixo central implica que variáveis físicas relevantes, como temperatura ou concentração, se distribuem de forma uniforme ao longo dos raios que partem do eixo. Nesse cenário, assume-se que tais variáveis dependem exclusivamente das coordenadas radial e, quando necessário, axial, desconsiderando qualquer variação em outras direções. Essa simplificação é amplamente adotada em estudos de transferência de calor, escoamento de fluidos e processos difusivos, por permitir a modelagem de sistemas complexos com menor custo computacional, sem comprometer a fidelidade das análises.

Quando ambas as simetrias, radial e axial, estão presentes, o problema físico torna-se axissimétrico. Nesses casos, é possível realizar a resolução numérica considerando apenas uma fração do domínio geométrico, como ilustrado na Figura 3.8. Essa abordagem é especialmente vantajosa em sistemas com geometria cilíndrica, a exemplo dos recipientes utilizados no processamento térmico de alimentos. A presença simultânea das simetrias permite a diminuição significativa do tempo computacional necessário para a solução, ao mesmo tempo em que mantém a precisão e a representatividade dos resultados obtidos.

Figura 3.8: Simetria axial: (a) retângulo inteiro; (b) metades simétricas do retângulo; (c) detalhe da malha geratriz.



Fonte: COSTA, 2015.

A simetria axial permite desconsiderar as variações angulares, assumindo que as propriedades do sistema se distribuem de maneira uniforme ao redor de um eixo. Por outro lado, a simetria radial implica que essas propriedades variam apenas em função da distância ao centro do sistema. A combinação dessas duas simetrias

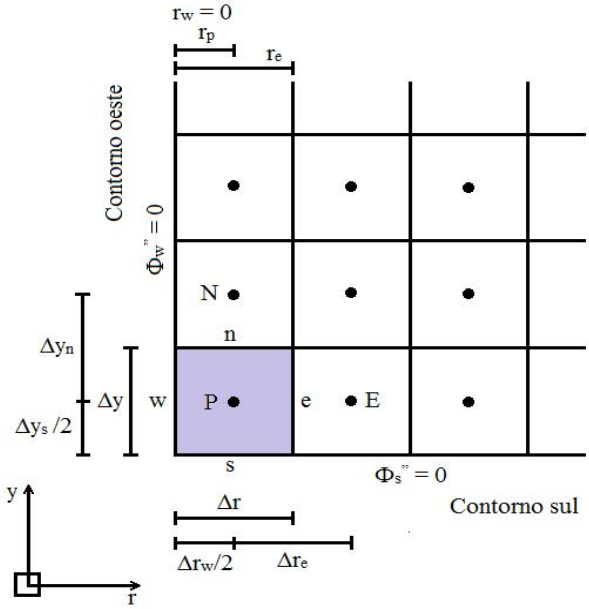
possibilita a modelagem do problema com uma malha simplificada, preservando a representatividade física do fenômeno analisado e facilitando a implementação de métodos numéricos, como os de diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos.

No contexto da simetria axial, aplica-se a condição de fluxo zero, como ilustrado, por exemplo, no contorno sul da metade superior da geometria destacada na Figura 3.8. Essa condição é matematicamente expressa pela Equação (3.31), garantindo a ausência de fluxo através da fronteira.

$$r_p \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_p - \Phi_s}{\frac{\Delta y_s}{2}} \right) \Delta r = 0 \qquad (3.31)$$

A Figura 3.9 mostra o volume de controle de ponto nodal P na fronteira sudoeste.

Figura 3.9: Volume de controle de ponto nodal P no contorno sudoeste



Fonte: COSTA, 2015.

Para o volume de controle a sudoeste desta metade como mostra a Figura 3.9, tem-se:

$$r_w \Gamma_w^{\Phi} \left(\frac{\Phi_p - \Phi_w}{\Delta r_w / 2} \right) \Delta y = 0 \tag{3.32}$$

$$r_p \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_p - \Phi_s}{\Delta y_s / 2} \right) \Delta r = 0 \tag{3.33}$$

Assim substituindo as Equações (3.32) e (3.33) na Equação (3.9) e fazendo as devidas simplificações, têm-se a Equação (3.34).

$$A_p \Phi_P = A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + B \tag{3.34}$$

onde

$$A_P = \lambda_p \, r_p \, \Delta r \frac{\Delta y}{\Delta t} + r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} - S_P \, r_p \, \Delta r \, \Delta y \tag{3.34}$$

$$A_e = r_e \, \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \tag{3.35}$$

$$A_n = r_p \, \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \tag{3.36}$$

$$B = \lambda_P^0 \, \Phi_P^0 \, r_p \, \Delta r \frac{\Delta y}{\Delta t} + S_C \, r_p \, \Delta r \, \Delta y \tag{3.37}$$

3.1.8 Avaliação do coeficiente de transporte Γ^{Φ} nas interfaces

Nesta seção será apresentado o esquema da média harmônica para o cálculo do coeficiente de transporte Γ^{Φ} nas faces dos volumes de controle para o método dos volumes finitos.

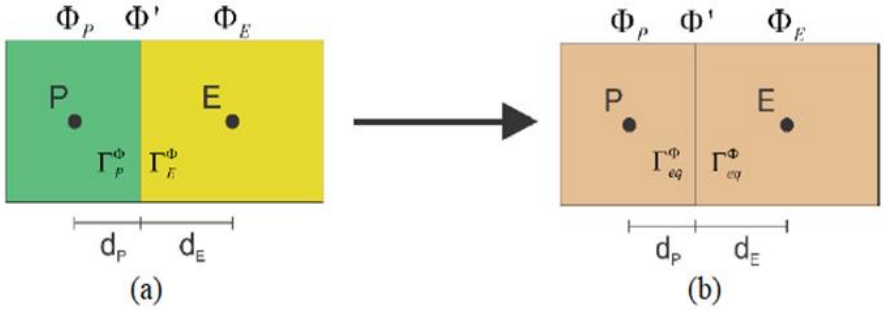
Para os pontos nodais o parâmetro de processo Γ^{Φ} pode ser calculado através de uma relação apropriada entre tal parâmetro e a variável dependente Φ (SILVA, 2007; SILVA, 2012; COSTA, 2015; MALISKA, 2017), de modo igual:

$$\Gamma^{\Phi} = f\left(\Phi, a, b\right) \tag{3.37}$$

onde *a* e *b* são os coeficientes de uma função que ajusta a solução numérica aos dados experimentais, sendo determinados por processo de otimização.

Se o coeficiente de transporte, Γ^{Φ}, for variável, a média harmônica deve ser utilizada para fazer uma estimativa de seu valor nas interfaces de cada volume de controle (PATANKAR, 1980; SILVA, 2007; COSTA, 2015; MALISKA, 2017). A expressão para Γ^{Φ}, foi obtida com base na Figura 3.10 (média harmônica).

Figura 3.10: Coeficiente de transporte: (A) nos pontos nodais P e E, respectivamente. (B) na interface do volume de controle.



Fonte: SILVA JUNIOR, 2015.

A partir das discretizações apresentadas, verifica-se que o conhecimento do parâmetro Γ^{Φ} nas interfaces de cada volume de controle é necessário. No caso do valor de Γ^{Φ} nos pontos nodais, ele é calculado pela Equação (3.37), a cada passo do processo de otimização. Para calcular Γ^{Φ} na interface entre os volumes de controle P e E, é utilizada a seguinte expressão (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2017):

$$\Gamma_{eq}^{\Phi} = \frac{\Gamma_P^{\Phi}\,\Gamma_E^{\Phi}}{f_d\,\Gamma_E^{\Phi} + (1-f_d)\,\Gamma_p^{\Phi}} \tag{3.38}$$

onde,

$$f_d = \frac{d_P}{d_P + d_E} \tag{3.39}$$

em que d_P e d_E são as distâncias da fronteira "e" para o ponto nodal "P" e "E", respectivamente. Para uma malha uniforme, $d_P = d_E$, f_d assume o valor 1/2.

Substituindo o valor de f_d na Equação (3.38), a expressão para Γ_e^{Φ} na interface, a partir de seu valor nos pontos nodais, fica mais simples:

$$\Gamma_{eq}^{\Phi} = \frac{2\Gamma_P^{\Phi}\,\Gamma_E^{\Phi}}{\Gamma_p^{\Phi} + \Gamma_E^{\Phi}} \tag{3.40}$$

A Equação (3.40) pode ser usada para Γ^{Φ} constante. Neste caso, $\Gamma_P^{\Phi} = \Gamma^{\Phi}$ e $\Gamma_E^{\Phi} = \Gamma^{\Phi}$, levando a equação a expressar um resultado previsto em que, $\Gamma_e^{\Phi} = \Gamma^{\Phi}$. Em concordância com Silva (2009), para volumes de controle nos contornos o valor de Γ^{Φ} pode ser feito igual ao valor deste parâmetro no ponto nodal do respectivo volume de controle.

3.2 Métodos de resolução de sistemas lineares

A formulação totalmente implícita resulta em um sistema de equações lineares, no qual cada incógnita corresponde ao valor da variável de interesse em um ponto nodal. Para resolver esse sistema em cada passo de tempo, foi utilizado, neste trabalho, o método iterativo de Gauss-Seidel, que se mostra eficiente para esse tipo de aplicação (SILVA JUNIOR, 2015). Uma das principais vantagens dessa formulação é sua estabilidade incondicional, ou seja, ela permanece estável independentemente do tamanho do passo de tempo adotado na discretização. Essa característica permite a utilização de intervalos de tempo maiores, contribuindo para a redução do custo computacional em simulações transientes, sem comprometer a precisão dos resultados.

3.2.1 Método numérico de Gauss-Seidel

Para um cilindro finito, a abordagem totalmente implícita gera, a cada intervalo de tempo, um sistema de equações lineares. A resolução desse sistema é realizada utilizando um método iterativo, como o método de Gauss-Seidel, que exige valores iniciais para as variáveis desconhecidas. Este método encontra a solução do

sistema de equações por meio de um processo de iterações sucessivas, até que a solução obtenha um grau de precisão que esteja dentro de um limite de erro previamente estabelecido (conhecido como limite de convergência). No caso da solução desenvolvida, a precisão foi de 10^{-8}.

3.2.2 Solução Numérica para a Condição de contorno do Primeiro Tipo

Com o objetivo de obter os parâmetros físicos dos processos de pasteurização abordados neste estudo, foi desenvolvido um otimizador que foi integrado às soluções numéricas para o caso bidimensional descrito nas seções anteriores. O referido otimizador foi desenvolvido a partir de um método inverso, no qual são atribuídos valores iniciais aos parâmetros e então estes são corrigidos a fim de minimizar uma função objetivo. A função objetivo utilizada foi o qui-quadrado, que é definido como segue:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\Phi_i^{exp} - \Phi_i^{sim}(\ \Gamma^{\Phi})\right]^2 \frac{1}{\delta_i^2} \tag{3.41}$$

onde Φ_i^{exp} é o valor médio da grandeza de interesse referente ao i-ésimo ponto experimental, $\Phi_i^{sim}(\Gamma^{\Phi})$ é o valor médio da grandeza de interesse calculado pela solução numérica como uma função de Γ^{Φ} e N_p, é o número de pontos experimentais, e $1/\delta_i^2$ é o peso estatístico referente ao i-ésimo ponto experimental. Assim a função objetivo Equação (3.41) depende de Γ^{Φ} e do coeficiente de transporte. Se Γ^{Φ} for considerado variável, isto é, $\Gamma^{\Phi} = f(\Phi, a, b)$, o qui-quadrado dependerá dos parâmetros a e b.

Neste estudo, considera-se condição de contorno do primeiro tipo variável, que se refere aos volumes em contato com o meio exterior, onde a resistência superficial ao fluxo de calor é desprezada.

3.3 *Software* desenvolvido para o cilindro finito

Para analisar o processo de pasteurização da polpa de graviola armazenada em um recipiente cilíndrico, foi adotado um modelo numérico. A solução numérica da equação de difusão foi obtida por meio do método dos volumes finitos, utilizando a condição de contorno do primeiro tipo e uma formulação totalmente implícita. O *software* utilizado inclui um algoritmo de otimização integrado ao "Numerical Heat Transfer", com a finalidade de gerar soluções numéricas bidimensionais e determinar os parâmetros do processo por meio da otimização, quando um conjunto de dados experimentais é conhecido.

PARTE B – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.4 Metodologia experimental

A presente pesquisa foi desenvolvida com o suporte do Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Unidade Acadêmica de Física da Universidade Federal de Campina Grande, localizada na cidade de Campina Grande – PB. Foram feitas gestões para a realização de experimentos sobre a transferência de calor durante o processo de pasteurização.

A pesquisa foi conduzida com o objetivo de atingir as metas estabelecidas. Inicialmente, foi desenvolvido um modelo matemático para descrever as trocas de energia entre o produto e o meio ambiente, com foco em corpos de geometria cilíndrica. O modelo deverá considerar, ao longo do processo, as propriedades termofísicas que variam em função da temperatura local.

O recipiente utilizado para acondicionar a polpa durante o processo de aquecimento é feito de vidro com formato cilíndrico. Sensores para medição da temperatura foram fixados no centro geométrico e na parte interna do recipiente. A amostra de polpa de graviola foi inicialmente colocada em um multiprocessador para homogeneização. Após atingir o equilíbrio térmico com o ambiente, a polpa foi transferida para o recipiente cilíndrico de vidro para o tratamento térmico. Os dados

coletados pelos termopares foram armazenados por meio de um programa computacional, que monitorou e registrou em tempo real as informações de temperatura.

Após a realização dos experimentos, foi verificado ser necessário aplicar uma solução numérica com condição de contorno de primeiro tipo variável, característica do problema em estudo. Para isso, utilizou-se um programa desenvolvido por Silva Junior e Silva (2018), originalmente destinado a condições de contorno de terceiro tipo. Este programa foi adaptado para incorporar condições de contorno de primeiro tipo variável ao longo do tempo e foi utilizado tanto para otimizar o processo quanto para simular o aquecimento do produto. Esta adaptação do *software*

para o estudo da transferência de calor entre o meio externo e um produto pastoso é uma das contribuições deste trabalho.

Além disso, foi realizada uma análise do comportamento transiente da temperatura experimental no centro geométrico do recipiente cilíndrico de vidro e na sua parede interna. Essa análise foi associada a modelos matemáticos, permitindo determinar os parâmetros que descrevem os fenômenos físicos com base em dados experimentais.

Com base nos resultados obtidos, foi realizada uma análise do impacto das condições do meio, da temperatura inicial e final dos produtos, do tempo de pasteurização e da qualidade do produto ao final do processo. Os resultados gerados foram comparados com dados experimentais reportados na literatura para validar as conclusões.

3.4.1 A matéria prima utilizada

A matéria prima utilizada no estudo foi a graviola, fruto da espécie (*Annona muricata L.*), adquirida em estágio adequado de maturação, considerando características visuais e sensoriais favoráveis ao processamento, como coloração, textura e integridade dos frutos, com aproximadamente 6 kg (Figura 3.11). O fruto foi adquirido no comércio local da cidade de Campina Grande – PB, e sua escolha se deu em função de se apresentar como saudável, com polpa firme e sem danos em sua estrutura. As graviolas foram transportadas para o Laboratório de Transferência de

Calor e Massa (LTCM) da Unidade Acadêmica de Física (UAF) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde as polpas foram processadas.

Figura 3.11: Matéria prima utilizada “Graviola”.



Fonte: Autoria própria.

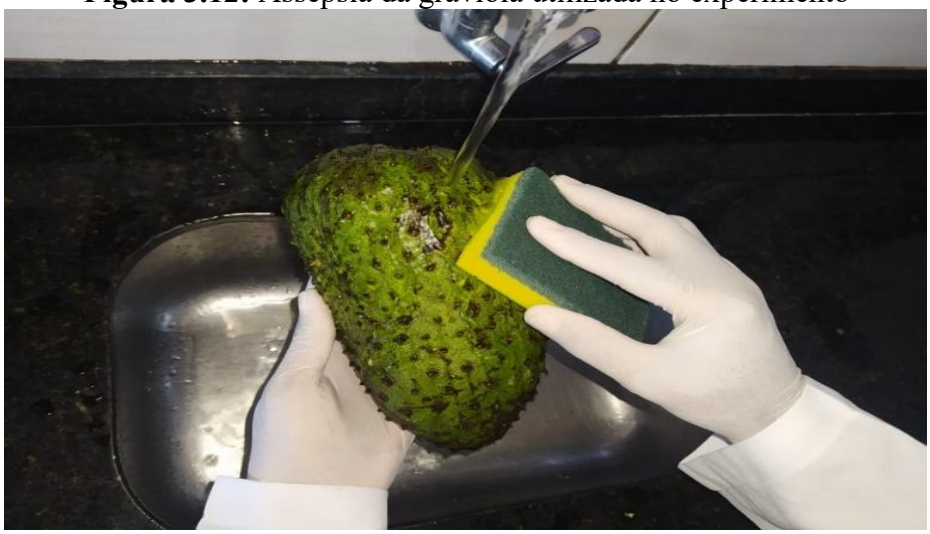
3.4.2 Preparações das amostras

Inicialmente, foram realizadas a esterilização e a higienização da bancada de trabalho, garantindo um ambiente adequado e livre de contaminantes para a execução do experimento. Em seguida, procedeu-se à limpeza e à assepsia do produto utilizado, com o objetivo de reduzir a presença de microrganismos e assegurar melhores condições de manipulação das amostras.

Antes do preparo das amostras, foram realizadas a assepsia e a esterilização dos recipientes e dos instrumentos utilizados no processo, empregando-se água aquecida, solução de hipoclorito de sódio e álcool 70º, de forma a garantir a adequada desinfecção dos materiais. Esses procedimentos foram fundamentais para minimizar possíveis fontes de contaminação durante as etapas experimentais.

Durante todo o procedimento, foram utilizados Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), tais como máscaras, luvas clínicas, toucas e jalecos, com o objetivo de garantir a segurança do manipulador e evitar contaminações indesejáveis no experimento, conforme ilustrado na (Figura 3.12).

Figura 3.12: Assepsia da graviola utilizada no experimento



Fonte: Autoria Própria.

Para a obtenção da polpa, o fruto foi inicialmente lavado em água corrente para remoção de impurezas e, em seguida, higienizado com auxílio de esponja com dimensões de 110 mm x 70 mm x 23 mm. Posteriormente, a graviola foi descascada cuidadosamente, e as partes cortadas foram acondicionadas em multiprocessador doméstico da marca Philips Walita, modelo com capacidade de 3,0 litros, potência de 1400 watts e equipado com seis lâminas removíveis em aço inox, com tecnologia ProBlend 6 (Figura 3.13), para homogeneização da amostra.

Figura 3.13: Liquidificador Phillips Walita 1400W.



Fonte: Autoria própria

As polpas foram obtidas sem a adição de água, totalizando aproximadamente 4.000 ml (4 litros). Após a extração, as amostras foram distribuídas em sacos plásticos de 500 ml cada (Figura 3.14), preenchendo completamente 8 sacos.

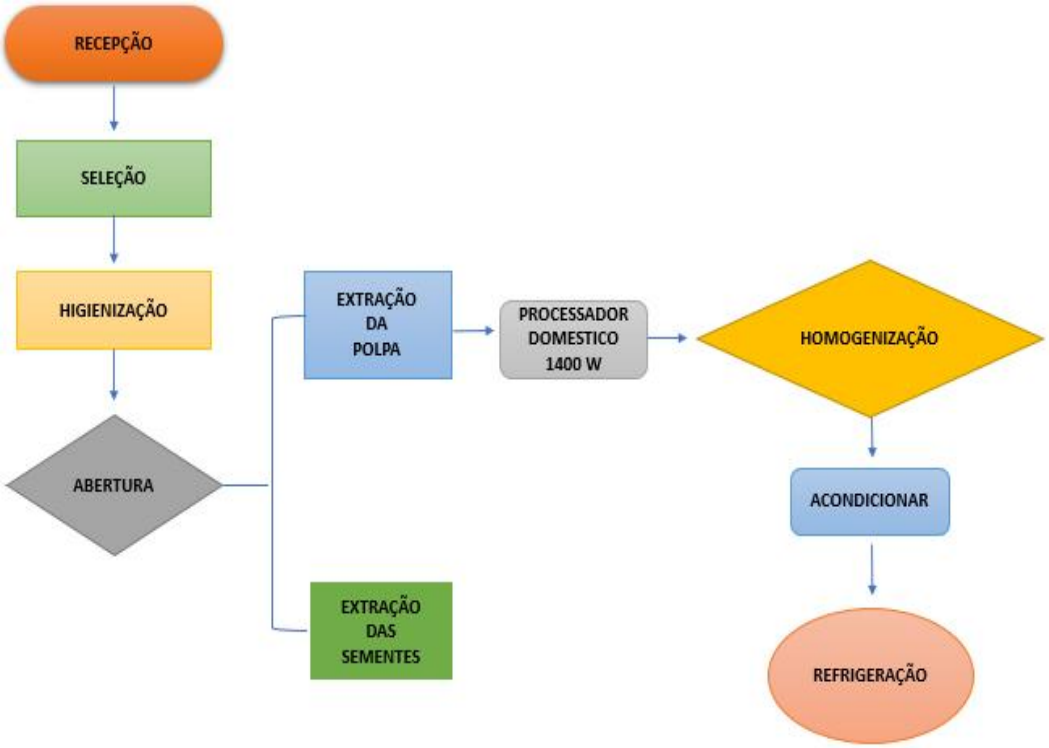
Figura 3.14: Acondicionamento da polpa da graviola.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 3.15 representa o processo de preparação da polpa da graviola (*Annona muricata*).

Figura 3.15: Fluxograma preparo da polpa.



Fonte: Autoria Própria.

Os sacos contendo as polpas foram armazenados em freezer, mantendo-se a uma temperatura de aproximadamente –22 °C, condição adequada para a preservação e estabilidade das amostras. Antes de iniciar os procedimentos experimentais, a polpa foi transferida para os recipientes cilíndricos de vidro e deixada sobre a bancada do laboratório por cerca de 24 horas, permitindo que atingisse o equilíbrio térmico com o ambiente climatizado. Após esse período, com a temperatura das amostras estabilizada, os procedimentos experimentais foram iniciados.

3.4.3 Fabricação do recipiente

Para o desenvolvimento do presente estudo, projetou-se inicialmente a aquisição de uma cuba de vidro com especificações pré-definidas, de modo a atender rigorosamente às exigências experimentais. Entretanto, constatou-se significativa dificuldade em localizar, no estado da Paraíba e, de modo mais amplo, na região Nordeste, empresas com capacidade técnica para confeccionar recipientes no formato cilíndrico proposto. Observou-se que a maioria dos fabricantes locais produzia apenas modelos quadrados ou, em alguns casos, não realizava a confecção sob medida, o que representou um desafio considerável na obtenção do material adequado.

Diante desse cenário, tornou-se imprescindível buscar fornecedores em outras regiões do país, uma vez que o atendimento às especificações previamente definidas era fundamental para a confiabilidade do estudo. Após extensa pesquisa, identificou-se a necessidade de recorrer a empresas com elevada capacidade técnica e experiência na produção de recipientes laboratoriais sob medida, capazes de garantir precisão dimensional, durabilidade e qualidade estrutural compatíveis com as exigências metodológicas do estudo.

Para atender a esses requisitos, optou-se pela SPECIAL GLASS – Vidraria e Equipamentos EIRELI Ltda, localizada na Rua do Morro Verde, 135, Parque Novo Horizonte, Itaquaquecetuba, SP, empresa reconhecida pela fabricação de vidrarias e equipamentos laboratoriais personalizados, com foco em confiabilidade, acabamento de alta qualidade e atendimento técnico especializado. Foram encomendados dois conjuntos no formato de cubas de vidro sob medida, conforme a Nota Fiscal Eletrônica nº 1924, os quais foram entregues na residência do pesquisador, no bairro do conjunto

Cinza, na cidade de Campina Grande, PB, garantindo a conformidade com as especificações técnicas e permitindo a continuidade do estudo experimental.

A Figura 3.16 apresenta o recipiente em formato de cuba, confeccionado em vidro e subdividido em duas partes, o que facilita o acondicionamento da amostra.

Figura 3.16: Medida interna largura.



Fonte: Autoria Própria.

O modelo utilizado apresenta geometria cilíndrica e reúne características fundamentais para aplicações em experimentos laboratoriais, como resistência a variações de temperatura, baixa dilatação térmica e elevada resistência ao calor. Essas propriedades contribuem para a segurança operacional, a estabilidade do sistema e a reprodutibilidade dos resultados experimentais.

Além disso, sua configuração geométrica favorece a distribuição mais uniforme do calor no interior do recipiente, permitindo um comportamento térmico mais controlado durante o processo de aquecimento. Esse aspecto é essencial para garantir maior precisão na análise dos dados, bem como maior confiabilidade na interpretação dos fenômenos térmicos observados.

As paredes do recipiente apresentam espessura uniforme, conforme ilustrado na Figura 3.17, o que contribui para a homogeneidade na condução de calor ao longo da estrutura. Essa característica também confere maior resistência mecânica ao sistema

durante o uso, atendendo aos requisitos de estabilidade, eficiência e segurança no processo experimental.

Figura 3.17: Recipiente cilíndrico de vidro.



Fonte: Autoria Própria.

O recipiente utilizado no experimento é composto por um cilindro de vidro dividido em duas cubas, cada uma com diâmetro interno de 35,4 mm e profundidade interna de 24,3 mm. Essas dimensões não inteiras resultam das limitações do processo de fabricação, que nem sempre permite a obtenção de medidas exatamente padronizadas. Apesar disso, as dimensões apresentadas se mantêm muito próximas do projeto inicial, sendo consideradas adequadas para a realização dos ensaios propostos.

A escolha do vidro transparente e da geometria cilíndrica contribuiu de forma significativa para a análise do comportamento térmico do sistema, permitindo a visualização indireta das condições internas durante o experimento. Essa configuração também favoreceu a padronização das condições de contorno experimentais, garantindo maior confiabilidade na coleta e interpretação dos dados térmicos obtidos.

A Figura 3.18 apresenta a cuba superior do recipiente, que possui dois orifícios especificamente projetados para a inserção dos termopares. Esses furos estão posicionados de maneira estratégica, sendo um localizado no centro da face e outro próximo à borda, permitindo o monitoramento da temperatura em diferentes regiões do sistema e assegurando maior representatividade das medições realizadas durante o experimento.

Figura 3.18: Recipiente cilíndrico de vidro.



Fonte: Autoria Própria.

Essa configuração permite o monitoramento simultâneo de diferentes regiões do recipiente, o que possibilita uma análise mais detalhada da distribuição de temperatura ao longo do sistema durante o processo de aquecimento. Além disso, o posicionamento estratégico dos sensores favorece a identificação de variações térmicas localizadas, especialmente entre regiões centrais e periféricas, sendo um aspecto essencial para a validação do comportamento térmico observado no experimento. Dessa forma, obtêm-se medições mais confiáveis, consistentes e representativas da evolução térmica do sistema ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 3.18.

Para a medição dos diâmetros e comprimentos dos recipientes, foi utilizado um paquímetro digital de alta precisão, equipado com display digital, o que facilita a leitura direta dos valores e reduz possíveis erros de interpretação, conforme apresentado na Figura 3.19. O instrumento utilizado é da marca Starrett, modelo 799 A, com escala máxima de 150 mm e resolução de 0,01 mm, permitindo a realização de medições com elevada precisão. Esse nível de exatidão é fundamental para garantir a confiabilidade das dimensões geométricas utilizadas nas análises experimentais e na modelagem do sistema.

Figura 3.19: Paquímetro digital em aço inoxidável, 150 mm.



Fonte: Autoria própria.

As principais características do recipiente cilíndrico utilizado no experimento estão apresentadas nas Figuras 3.20 (a e b), onde são indicadas suas medidas internas, relevantes para a análise térmica realizada.

O volume interno do cilindro de vidro foi calculado considerando a sua geometria cilíndrica e as dimensões internas do recipiente. Para isso, utilizou-se a fórmula do volume de um cilindro Equação (3.42):

$$V = \pi r^2 h \tag{3.42}$$

onde r é o raio interno do cilindro e h é a profundidade interna, considerando os valores das dimensões internas do cilindro de vidro:

- Material: Vidro
- Espessura da parede: ≈ 2,0 mm
- Profundidade interna: 48,6 mm
- Diâmetro interno: 70,8 mm

O cálculo resulta em um volume aproximado:

$$V_{interno} \approx 191{,}33 \text{ mL} \tag{3.43}$$

Figura 3.20: Medidas internas: (a) profundidade e (b) diâmetro interno.

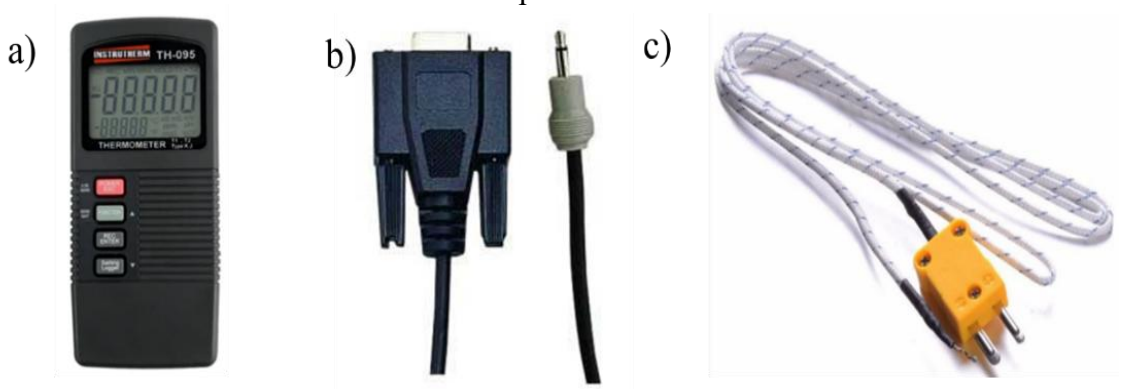


Fonte: Autoria própria.

3.4.4 A aquisição dos dados de temperatura

A Figura 3.21 representa os equipamentos utilizados para a captura da temperatura na amostra de polpa de graviola.

Figura 3.21: (a) Termômetro digital portátil TH-095; (b) cabo RS-232; e (c) termopar tipo K.



Fonte: (a) Manual de Instrução, (b) Internet e (c) Autocore Robótica (2023).

O acompanhamento da distribuição de calor foi realizado por meio da medição da temperatura no interior da amostra de polpa de graviola, utilizando

sensores do tipo termopar K (Figura 3.21c). Os dados térmicos foram adquiridos e registrados com o auxílio de um termômetro digital portátil TH-095 (Figura 3.21a), conectado por meio de um cabo RS-232 (Figura 3.21a), assegurando medições contínuas e confiáveis ao longo do experimento.

O termopar (Figura 3.21 c) é um sensor de temperatura que funciona a partir da junção de dois metais diferentes, conectados em suas extremidades. No experimento, uma extremidade do termopar é posicionada no centro do recipiente contendo a amostra a ser pasteurizada, enquanto a outra é fixada na superfície lateral do recipiente, de modo que fique completamente isolada do contato com o produto em seu interior, formando um circuito fechado. O termopar gera uma força eletromotriz que, ao ser conectado a um termômetro digital portátil (Figura 3.21 a), permite a interpretação do sinal e a relação de sua saída com uma temperatura específica.

O termopar utilizado é composto por fios de Chromel e Alumel, correspondentes aos polos positivo e negativo, respectivamente. A conexão com o sistema de aquisição foi feita por meio do cabo RS-232 (Figura 3.21b), especificado na Tabela 3.1, acoplado a um notebook.

Tabela 3.1: Instrumentos e acessórios para medição de temperatura.

Equipamentos	Especificações	
Termômetro digital portátil	TH-095 (0º a 1300°C)	Saída RS-232 e Data-logger, 2 canais
Sensor Termopar	MTK-01 (-40°C a 204°C)	Tipo K (Junção Chromel – Alumel)
Cabo RS-23 Instrutherm	CRS-20	

Fonte: Autoria própria.

Para a realização das atividades de coleta e análise dos dados experimentais, foi utilizado um notebook da marca Acer, modelo Aspire 5 A515-51G-C97B, equipado com processador Intel Core i5-8250U, 8 GB de memória RAM DDR4, disco rígido de 1 TB e placa gráfica dedicada NVIDIA GeForce MX130. O sistema operacional Windows XP foi executado em ambiente virtual por meio do *software* Oracle VM VirtualBox, o qual possibilitou a coleta, o armazenamento e o processamento dos dados obtidos durante o experimento.

3.5 Banho maria Kacil

O banho-maria Kacil constitui um equipamento amplamente utilizado em laboratórios de física, química e biologia, especialmente em procedimentos que exigem controle térmico preciso e aquecimento uniforme. O desenvolvimento desse dispositivo no Brasil ocorreu ao longo do século XX, quando empresas nacionais passaram a produzir versões robustas e acessíveis de aparelhos de termorregulação empregados em centros de pesquisa internacionais. Entre essas iniciativas, destacou-se a Kacil Equipamentos Científicos, responsável por projetar modelos destinados ao ensino técnico e universitário.

A criação do banho-maria Kacil atendeu à necessidade de padronização de processos experimentais que envolvem aquecimento indireto, reduzindo riscos de degradação térmica das amostras. O equipamento foi inicialmente construído em aço inoxidável e equipado com resistência elétrica e termostato mecânico, posteriormente substituídos por sistemas eletrônicos de maior precisão. Essas atualizações permitiram maior estabilidade na manutenção da temperatura, característica essencial para experimentos de cinética química, análises microbiológicas e testes de viscosidade.

Com a evolução das demandas laboratoriais, a Kacil incorporou aos modelos mais recentes sistemas de circulação interna da água, aumentando a homogeneidade térmica, além de controles digitais que possibilitam ajustes finos e monitoramento em tempo real. Tais aprimoramentos contribuíram para consolidar o equipamento como ferramenta confiável tanto para práticas de ensino quanto para pesquisas experimentais com maior rigor metodológico.

Atualmente, o banho-maria Kacil permanece amplamente utilizado em instituições de ensino e pesquisa, sendo reconhecido por sua durabilidade, estabilidade térmica e facilidade de operação. Sua trajetória representa um marco na evolução dos instrumentos científicos nacionais e evidencia sua relevância para a consolidação de práticas laboratoriais seguras e confiáveis.

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizado o banho-maria digital Kacil (Figura 3.22), modelo BM02, um equipamento projetado para garantir controle preciso de temperatura em processos laboratoriais e industriais.

Figura 3.22: Banho-maria digital Kacil, modelo BM-02.



Fonte: Autoria Própria.

O equipamento é bivolt e possui uma cuba interna com dimensões de 300 mm × 240 mm × 150 mm, com volume aproximado de 9 litros. A cuba é fabricada em aço inoxidável, material que proporciona maior resistência, durabilidade e melhor conservação do equipamento durante o uso.

O modelo BM02 é equipado com um sistema eletrônico de controle de temperatura baseado na tecnologia Proporcional, Integral e Derivativa (PID). Esse sistema permite o monitoramento contínuo da temperatura por meio de um indicador digital, que apresenta resolução de 0,1°C, proporcionando maior precisão e confiabilidade nas medições.

Além disso, o controle PID realiza ajustes automáticos na temperatura da água de acordo com o valor de referência previamente estabelecido. Esse mecanismo contribui para a redução do tempo de aquecimento e garante maior estabilidade térmica durante o funcionamento do equipamento, tornando o processo mais eficiente e controlado.

Além disso, o banho-maria BM02 (Figura 3.22) é projetado para proporcionar um aquecimento rápido e uma manutenção precisa da temperatura desejada, tornando-

o ideal para aplicações que exigem um controle térmico rigoroso. Sua estrutura, aliada a funcionalidades avançadas, assegura uma operação eficiente e estável, tornando-o adequado para uma ampla gama de processos laboratoriais.

3.6 Procedimentos experimentais

Inicialmente, foi preparada uma cuba cilíndrica de vidro, na qual foram instalados dois termopares do tipo K. O primeiro sensor foi posicionado no ponto central da cuba, enquanto o segundo foi fixado na parede lateral interna. Para evitar contato com a amostra, esse segundo sensor foi isolado com fita isolante e silicone, garantindo contato apenas com a superfície do vidro (Figura 3.23).

Dessa forma, os sensores foram capazes de registrar a temperatura em dois pontos distintos do sistema: no centro geométrico do recipiente e na sua superfície lateral.

Figura 3.23: Cubas cilíndricas de vidro conectadas aos termopares.



Fonte: Autoria Própria.

Após o processamento, a polpa foi transferida, com o auxílio de uma colher, para um recipiente cilíndrico de vidro, preenchendo-o completamente (Figura 3.24).

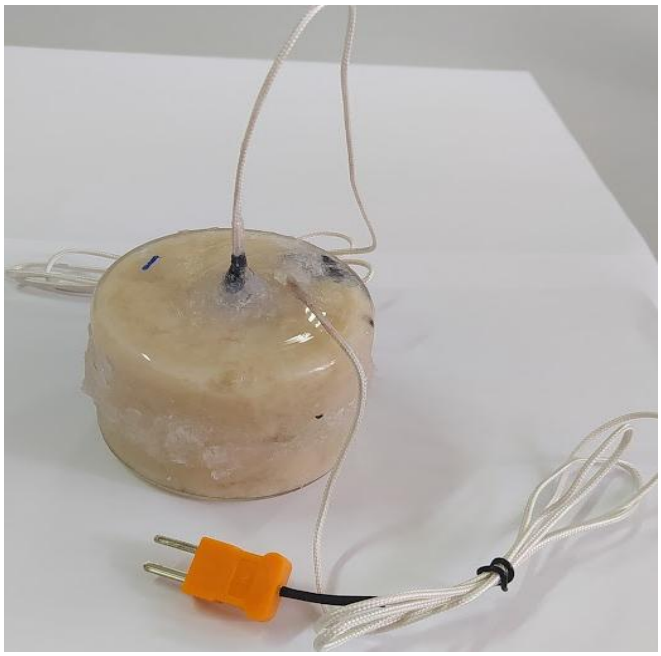
Figura 3.24: Recipiente contendo a polpa acondicionada.



Fonte: Autoria própria.

As duas partes do recipiente foram acopladas e a superfície externa circular foi tampada e vedada com silicone de alta temperatura (Figura 3.25), de forma que o sistema ficou isolado do ambiente externo, evitando a passagem de água para o recipiente durante a pasteurização.

Figura 3.25: Preparação do recipiente utilizado no experimento.



Fonte: Autoria própria.

Para a vedação, utilizou-se o silicone Poly Fort, um selante acético de alta aderência, adequado para superfícies como vidro e alumínio conforme demonstrado na Figura 3.26.

Figura 3.26: Silicone Poly Fort utilizado na vedação dos recipientes experimentais.



Fonte: Autoria Própria.

O silicone empregado neste estudo foi adquirido em estabelecimento comercial de materiais de construção localizado na cidade de Campina Grande–PB. Sua seleção ocorreu em razão da necessidade de um material capaz de suportar variações térmicas sem comprometer o desempenho do sistema experimental. Destaca-se que a obtenção de um produto com resistência adequada não foi simples, visto que grande parte dos silicones disponíveis comercialmente não atendia às exigências da pesquisa.

O material escolhido apresenta estabilidade térmica entre −40 °C e 150 °C, preservando suas propriedades físicas e estruturais sem deformações relevantes. Apresenta ainda elevada capacidade de vedação e resistência à umidade, reduzindo perdas térmicas e prevenindo contaminações ou vazamentos externos durante o experimento. Além disso, possui flexibilidade, boa resistência mecânica, garantindo a integridade do sistema mesmo após ciclos sucessivos de aquecimento e resfriamento. Assim, sua utilização contribuiu para maior confiabilidade experimental e melhor repetibilidade dos resultados obtidos.

Em seguida, o recipiente contendo a amostra foi mantido sobre a bancada do laboratório por um período de 24 horas, permitindo que o sistema atingisse o equilíbrio térmico com o ambiente experimental. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de garantir condições térmicas iniciais uniformes, minimizando gradientes de temperatura que pudessem interferir na aquisição dos dados experimentais. Após esse intervalo, os termopares previamente fixados em posições estratégicas do recipiente foram cuidadosamente conectados ao termômetro digital portátil modelo TH-095 (Figura 3.27), equipamento dotado de dois canais independentes de medição e alimentado por bateria de 9 V. A conexão dos sensores possibilitou o monitoramento simultâneo das temperaturas em diferentes pontos do sistema, assegurando maior precisão e confiabilidade durante o processo de coleta dos dados experimentais.

Figura 3.27: Termômetro digital portátil modelo TH-095 utilizado no experimento.

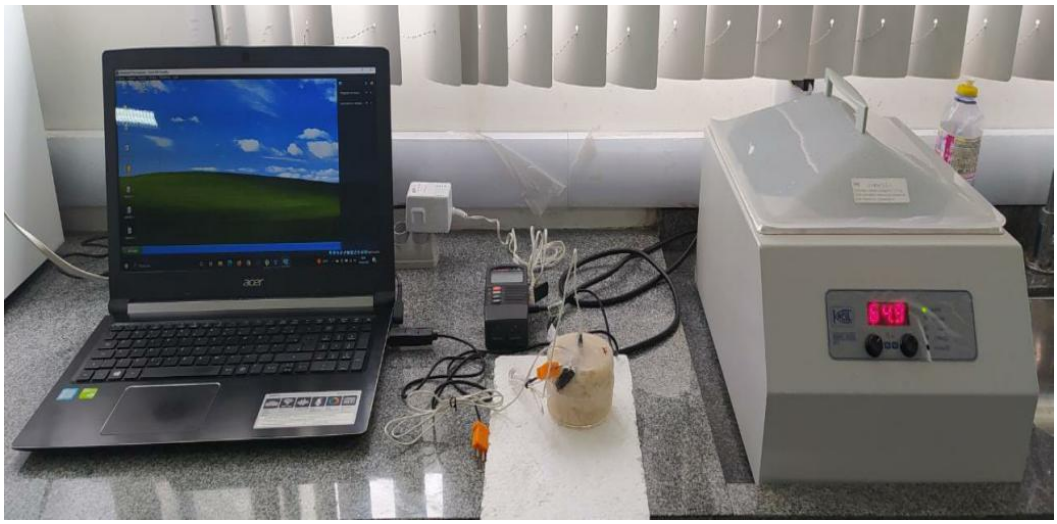


Fonte: Autoria Própria.

O termômetro foi conectado a um notebook da marca Acer Aspire 5, equipado com processador Intel Core i5 e memória de 8 GB DDR4, por meio de um cabo RS-232. Ao final desse processo, o recipiente foi colocado em banho Maria para iniciar a pasteurização (Figura 3.28). A aquisição dos dados ocorreu mediante um *software* DL 2005, compatível com a plataforma Windows, responsável pelo registro e armazenamento das medições em arquivos digitais no formato .txt. Esse procedimento

possibilitou o monitoramento e o acompanhamento contínuo da temperatura em tempo real, além de permitir o posterior tratamento e análise dos dados experimentais.

Figura 3.28: Configuração do experimento realizado.



Fonte: Autoria própria.

É importante destacar que o experimento conduzido nesta pesquisa teve como objetivo desenvolver um tratamento térmico em que o centro geométrico da amostra, considerado o ponto mais crítico, atingisse o equilíbrio térmico com o restante da amostra. Para isso, o banho-maria Kacil foi devidamente instalado, e água foi colocada no tanque interno para ser aquecida. A temperatura de pasteurização utilizada foi de 65 °C, e a tampa do equipamento foi mantida acoplada para assegurar a estabilidade da temperatura.

Para garantir a integridade do equipamento, algumas medidas de precaução foram necessárias para sua utilização. Não se deve utilizar o equipamento sem água suficiente para cobrir o sensor de temperatura, localizado acima da base de proteção da resistência. A falta de água na cuba pode causar danos permanentes à resistência. Nunca deve-se usar o equipamento sem a base de proteção da resistência, pois a ausência dessa base compromete o controle de temperatura e deixa a resistência desprotegida.

Após a temperatura desejada ser alcançada, o recipiente cilíndrico de vidro contendo a polpa foi inserido no banho-maria Kacil, onde a amostra foi aquecida de forma gradual até que o ponto crítico, considerado o centro geométrico do material, atingisse a temperatura de 65 °C dentro do próprio banho-maria. Atingida essa

temperatura, ela foi mantida por mais 30 minutos, em conformidade com o binômio (tempo x temperatura), garantindo o tratamento térmico adequado da amostra. A coleta de dados foi realizada em intervalos previamente definidos, e a temperatura da água no interior do aparelho foi monitorada continuamente por meio do termostato do equipamento, que regula automaticamente o sistema de aquecimento (Figura 3.29).

Figura 3.29: Monitoramento térmico da água durante o experimento.



Fonte: Autoria Própria.

A adoção da temperatura de 65 °C deve-se ao fato de esta representar uma condição de segurança entre os limites de 62 °C e 68 °C recomendados para processos de pasteurização, garantindo a efetiva inativação de microrganismos sem comprometer as propriedades sensoriais e nutricionais do produto.

Após o centro geométrico da amostra atingir a temperatura de 65 °C, essa temperatura foi mantida por mais 30 minutos, garantindo um aquecimento uniforme e assegurando a eficácia do tratamento térmico. Essa etapa, realizada em conformidade com as diretrizes gerais de segurança alimentar, preserva a estabilidade físico-química e microbiológica da polpa durante o processo de pasteurização.

Concluída essa etapa, a amostra foi imediatamente transferida para uma caixa de isopor de dimensões 40 cm × 30 cm × 25 cm, previamente preenchida com gelo, para promover o resfriamento rápido (Figura 3.30). Esse procedimento é fundamental para interromper imediatamente os efeitos do calor, prevenindo a continuidade de reações enzimáticas ou químicas que poderiam comprometer as propriedades

sensoriais e nutricionais da polpa. Além disso, o resfriamento rápido reduz o risco de proliferação de microrganismos remanescentes, garantindo a segurança alimentar e a estabilidade microbiológica do produto, encerrando o procedimento experimental.

Figura 3.30: Caixa de isopor utilizada para resfriamento



Fonte: Autoria própria

O experimento foi replicado seis vezes, permitindo a obtenção de dados consistentes e confiáveis. Para controle e rastreabilidade, adotou-se um sistema de codificação composto por duas letras seguidas de um número: GR1, GR2, GR3, GR4, GR5 e GR6. As letras "GR" indicam a origem da polpa (graviola), enquanto os números representam a sequência das experiências, da primeira (1) à sexta (6), assegurando a organização e padronização de todo o procedimento experimental.

3.7 Metodologia da análise e resultados das análises físico-químicas e microbiológico

As análise fisico-quimicas foram realizadas no laboratório de Bromatologia vinculado ao centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande, localizado na cidade de Cuíte, Paraiba.

As polpa *in natura* da graviola e a polpa pasteurizada foram avaliadas quanto às características físicas e físico-químicas: verificação da atividade de água a 25 ºC, por leitura em equipamento Aqualab (Meter, AquaLab Series 4TEV, São José dos Campos, São Paulo, Brasil); umidade por secagem em estufa a 105ºC até obtenção de massa constante; teor de cinzas (resíduo mineral fixo – RMF) foi quantificado por carbonização seguida de incineração em forno mufla (modelo 0612, Jung, Blumenau - SP, Brasil) a 550 ºC; teor de proteína pelo método de Micro-Kjeldahl todas pela AOAC (2016); determinação de lipídeos utilizando o método Folch, Less e Sloane-Stanley (1957).

O potencial hidrogeniônico (pH) foi utilizado na metodologia descrita pela AOAC (2016), por meio de pHmetro digital: (GEHAKA, modelo PG1800, São Paulo - SP, Brasil), calibrado previamente utilizando soluções tamponantes de pH 4,0 e 7,0, com a imersão do eletrodo em uma solução aquosa após agitação. A acidez titulavel seguiu metodologia descrita pela IAL (2008) por meio da titulação, onde certa quantidade da amostra com adição de hidróxido de sódio atinge o ponto de viragem com ajuda de um indicador, nesse caso com o auxílio de um medidor de pH.

3.8 Determinação de compostos de fenólicos totais e atividade antioxidante total

3.8.1 Elaboração do extrato

Para quantificar os compostos bioativos das polpas foi obtido um extrato. Incialmente foi pesado 1g de cada polpa em uma balança analítica (RADWAG) com auxílio de um becker e adicionado 10 mL de etanol a 80%, sendo essa mistura submetida a agitação em chapa agitadora por 20 minutos. Em seguida, a mistura foi acondicionada em tubos falcon e centrifugada por 10 minutos a 3000 g em centrífuga (Novatecnica). Logo após, a fase superior foi vertida em uma proveta graduada e o volume obtido foi completado para 10mL com etanol a 80%. Por fim, os extratos obtidos foram novamente adicionados em tubos falcon devidamente codificados e cobertos com papel alumínio e analisados.

3.8.2 Compostos Fenólicos Totais

Para determinação do teor de compostos fenólicos totais utilizou-se a metodologia descrita por Liu *et al*. (2002), com adaptações, onde 250 µL do extrato foi misturado em tubo de ensaio com 1250 µL do reagente Folin-Ciocalteau a 10%. As soluções foram agitadas por 30 s em Vortex (Logen Scientific, modelo LSM56-II-VM, Fortaleza, Ceará, Brasil) e armazenadas em temperatura ambiente (23 ± 0,5 °C) na ausência da luz por 6 min. Após, foram adicionadas 1000 µL da solução de carbonato de sódio a 7,5%. A mistura foi levada ao banho maria (Novatecnica, modelo NT232, Piracicaba, São Paulo, Brasil) a uma temperatura de 50 ±1 °C, durante 5 min. Em seguida, a absorbância foi verificada a 765 nm utilizando espectrofotômetro (BEL Photonics, Piracicaba, São Paulo, Brasil). Também foi realizado um teste branco com a ausência dos extratos para zerar o espectrofotômetro. O conteúdo de compostos fenólicos totais das amostras foi determinado utilizando uma curva padrão preparada com ácido gálico (Sigma-Aldrich, St. Louis, MA, USA). Os resultados expressos como miligramas de equivalente de ácido gálico (EAG) por cem gramas da amostra (mg EAG/100 g).

3.8.3 Atividade Antioxidante Total

Para a avaliação da atividade antioxidante foram utilizados dois métodos distintos: FRAP (Ferric reducing ability of plasma) e ABTS (2,2-azino-bis (3-etierminação da atilbenzo-tiazoline)-6-sulfonic acid), cujas metodologias seguem descritas a seguir.

Para atividade antioxidante por meio da redução do ferro (FRAP) foi utilizada a metodologia descrita por Benzie e Strain (1996), adaptada por Pulido *et al.* (2000). O reagente FRAP foi preparado exatamente no momento da análise, através da mistura de 11 mL de solução tampão acetato de sódio anidro a 0,3 M (pH 3,6), 1,1 mL de solução TPTZ (2,4,6-tris (2-pyridyl)-s-triazine) a 10 mM/L em uma solução de HCl a 40 mM e cloreto férrico (FeCl3) a 20 mM. Para a análise, uma alíquota de 200 µL do extrato da amostra foi adicionado a 1800 µL do reagente FRAP em um tubo de ensaio e levados ao banho maria (Novatecnica) a 37 ± 1°C por 30 min. A absorbância foi

medida a 593 nm em espectrofotômetro (BEL Photonics). A curva padrão foi realizada com Trolox 1 mM) e os valores expressos em micromoles de capacidade antioxidante equivalente de Trolox (CAET) por gramas de amostra (μmol TEAC/g).

O método ABTS foi realizado de acordo com a metodologia de Ksurveswaran *et al*. (2007), com algumas modificações. Inicialmente, formou-se o radical ABTS•+ a partir da reação de 5 mL de solução de ABTS•+ (2,2-azino-bis (3-etilbenzo-tiazoline) -6-sulfonic acid) a 7 mM com 88 μL de solução de persulfato de potássio 140 mM (concentração final de 2,45 mM), que foram incubados em temperatura de 25°C, na ausência de luz, durante 12-16 h. Uma vez formado o radical, o mesmo foi diluído em água destilada até obter o valor de absorbância de 0,800 (± 0,020) a 734 nm. A partir do extrato foram preparadas quatro diluições diferentes, em triplicata. Em ambiente escuro foi transferido para um tubo de ensaio uma alíquota de 100 μL das diluições do extrato e adicionado 500 μL do radical ABTS•+. Após, os tubos de ensaio foram mantidos em repouso na ausência de luz por 6 min. Em seguida, realizou-se a leitura da absorbância a 734 nm em espectrofotômetro (BEL Photonics). Também foi feita uma solução "controle" que consistiu em uma alíquota de 100 μL do solvente extrator do extrato adicionada de 500 μL do radical ABTS•+. A solução "branco" foi o solvente extrator de cada extrato, utilizada para zerar o espectrofotômetro. Os resultados foram expressos em micromoles de capacidade antioxidante equivalente de Trolox (TEAC) por grama de amostra (μmol TEAC/g).

3.9 Análise microbiológica

3.9.1 Contagem de Bactérias totais

As amostras foram inicialmente codificadas conforme seu estado: IN (*in natura*) e TT (submetidas a tratamento térmico). Para a análise microbiológica, realizou-se a diluição seriada das amostras em água peptonada, repetindo o processo até a terceira diluição. Para cada diluição, uma alíquota foi aplicada em placas Petrifilm AC, seguindo o procedimento recomendado pelo fabricante. As placas foram incubadas a 35 – 37 °C por 48 horas, após as quais as colônias foram contabilizadas. As diluições foram identificadas numericamente (-1, -2, -3) correspondendo à ordem sequencial das

diluições, permitindo o cálculo da densidade microbiana total por unidade de volume da amostra. Os resultados foram expressos em Unidades Formadoras de Colônia por grama de amostra (UFC/g).

4 CAPÍTULO: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações preliminares

No capítulo anterior, foram apresentados os modelos matemáticos utilizados na simulação da transferência de calor em sólidos cilíndricos, bem como a metodologia experimental empregada neste estudo. No presente capítulo, são apresentados os resultados experimentais obtidos, o *software* empregado para otimização e simulação, e a comparação desses resultados com dados disponíveis na literatura.

O conhecimento de propriedades termofísicas, como difusividade e condutividade térmica, é fundamental para processos de conservação de alimentos, influenciando o tempo de processamento, os custos operacionais e a segurança alimentar (MACHADO, 2019). Esses parâmetros permitem simular a propagação de calor em produtos cilíndricos e estimar o tempo necessário para a inativação de micro-organismos patogênicos.

Neste capítulo, são detalhados os resultados das simulações numéricas e dos dados experimentais da pasteurização da polpa de graviola. Inicialmente, analisam-se os perfis de temperatura e a penetração de calor no produto, considerando diferentes abordagens para a difusividade térmica. Em seguida, os resultados numéricos são comparados com os dados experimentais e com valores disponíveis na literatura, a fim de validar o modelo desenvolvido.

Por fim, discute-se a coerência física dos modelos, sua aplicabilidade em processos térmicos de alimentos e as implicações para a otimização da pasteurização e o aprimoramento da modelagem da transferência de calor.

4.2 Análise da penetração do calor: resultados experimentais com condição de contorno Dirichlet

4.2.1 Transferência de calor para a polpa da Graviola

Nas pasteurizações realizadas no presente estudo, a polpa da graviola foi inserida em um recipiente com geometria cilíndrica. A equação de difusão foi

discretizada supondo a difusividade térmica variando com a temperatura local, α(T), e resolvida para que a cinética de penetração de calor pudesse ser analisada. Na simplificação da equação de difusão foram feitas as considerações: $\lambda = 1$, $\Gamma^{\Phi} = \alpha = k/(\rho c_p)$, e $\Phi = T$.

A difusividade térmica aparente foi relacionada com a temperatura local no interior do recipiente, visto que dados experimentais se encontravam em estado transiente durante o processo de aquecimento, apresentando variações consideráveis entre as temperaturas inicial e final. Por este motivo, foram feitas otimizações para a cinética de penetração do calor no centro do recipiente usando diversas expressões crescentes que representam a difusividade térmica aparente como função da temperatura local.

4.2.2 Dados experimentais das pasteurizações

Com o objetivo de verificar a penetração do calor na polpa de graviola em função do tempo, foram realizados seis experimentos, doravante denominados GR1, GR2, GR3, GR4, GR5 e GR6, com um termopar posicionado no centro e outro na parede interna da amostra. Os valores tabelados de todas as experiências realizadas e utilizados neste trabalho se encontram no anexo.

O comportamento médio da cinética de penetração de calor, doravante denominado GRM (Graviola Média), também foi analisado ao longo do processo. Observou-se a evolução da temperatura no interior da amostra até que o ponto central atingisse 65 °C, temperatura estabelecida como referência para o tratamento térmico. Após esse instante, adotou-se o critério de manutenção do aquecimento por mais 30 minutos, com a finalidade de garantir a completa efetividade do processo de pasteurização e assegurar maior uniformidade térmica.

A Tabela 4.1 mostra os valores das temperaturas iniciais e finais de cada pasteurização realizada, bem como essas temperaturas para a média das pasteurizações, com base nas temperaturas registradas no centro geométrico das amostras durante as experiências (GR1, GR2, GR3, GR4, GR5 e GR6).

Tabela 4.1: Pasteurizações realizadas na pesquisa e respectivos valores de temperatura e número de pontos selecionados.

Pasteurização	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Nº de pontos
GR1	25.6	65.2	100
GR2	25.1	65.1	107
GR3	25.4	65.0	110
GR4	25.5	65.2	118
GR5	25.7	65.6	89
GR6	25.5	65.5	103
GRM	25.5	65.2	118

Fonte: Autoria própria.

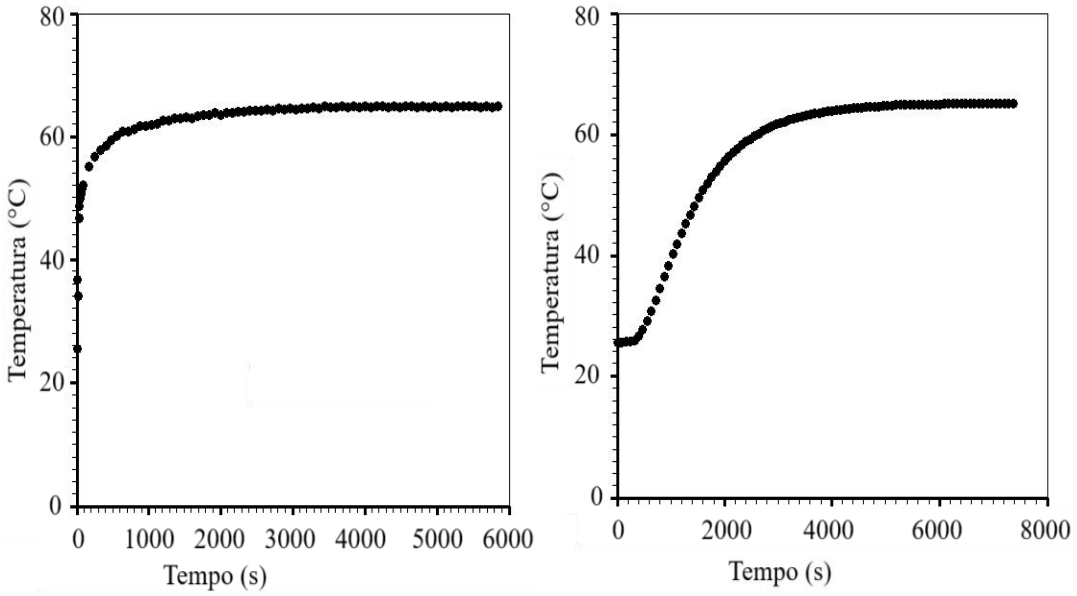
Durante a coleta dos dados, as temperaturas foram registradas a cada 10 segundos nos primeiros 80 segundos, permitindo uma análise mais detalhada nesse estágio inicial. A partir do segundo 81, os intervalos foram ampliados para 80 segundos, com o registro das temperaturas em cada intervalo subsequente, a fim de otimizar a coleta de dados nas fases posteriores, sem comprometer a precisão dos resultados. Em razão da variação nos intervalos de tempo adotados, o número de pontos coletados apresentou diferenças entre os experimentos, conforme ilustrado na Tabela 4.1.

4.3 Cinética de calor no centro e na borda do recipiente a partir de dados experimentais

Para os seis experimentos realizados, o *software* LAB Fit Curve Fitting V 7.2.48 (Silva e Silva, 2009) foi usado para apresentar o conjunto de pontos representativos das temperaturas obtidas pelos termopares fixados no centro e na borda interna do recipiente, em cada experiência realizada. Os gráficos correspondentes a cada experimento estão apresentados nas Figuras 4.1 a 4.6, e apresentam semelhanças nos perfis de temperaturas de equilíbrio térmico em ambos os casos analisados.

A Figura 4.1 ilustra o perfil da cinética de aquecimento para a pasteurização GR1, considerando as medições realizadas no centro e na borda do recipiente. Os valores coletados encontram-se disponíveis na Tabela B.1 e B.2 (Apêndice B).

Figura 4.1: Pontos experimentais da temperatura para a amostra GR1 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro).



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

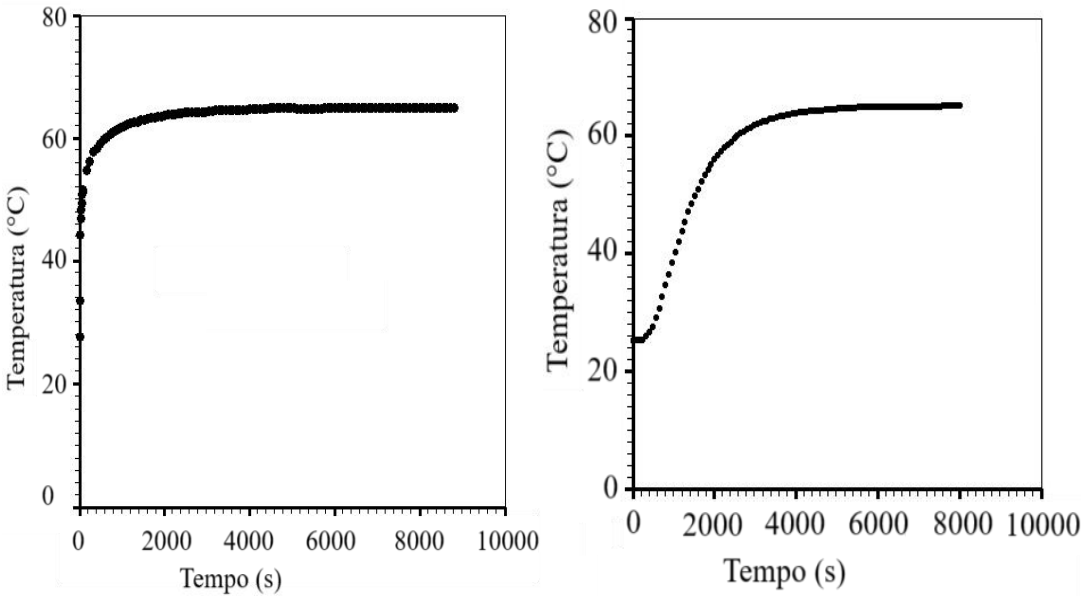
No perfil mostrado na Figura 4.1(a), referente à temperatura registrada pelo termopar fixado na superfície interna da parede de vidro do recipiente, observa-se que a temperatura aumenta gradualmente a partir do valor inicial de 25,5 °C, atingindo aproximadamente 65,0 °C em 4001 segundos. Após esse ponto, pequenas oscilações em torno da temperatura de equilíbrio são registradas, até que o centro da amostra alcance a estabilidade térmica.

Conforme apresentado na Figura 4.1(b), a temperatura no centro do recipiente permaneceu praticamente constante por um breve período antes de aumentar gradualmente, atingindo a temperatura de equilíbrio de 65,0°C em 5521 segundos. A partir desse momento, foi mantida por mais 30 minutos, obedecendo ao tempo de pasteurização recomendado na literatura.

A Figura 4.2 apresenta os gráficos da cinética de aquecimento para a pasteurização GR2, mostrando os resultados no centro e na borda do recipiente. Os

valores coletados nesta experiência estão registrados nas Tabelas B.3 e B.4 do Apêndice B.

Figura 4.2: Pontos experimentais da temperatura para a amostra GR2 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro).



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

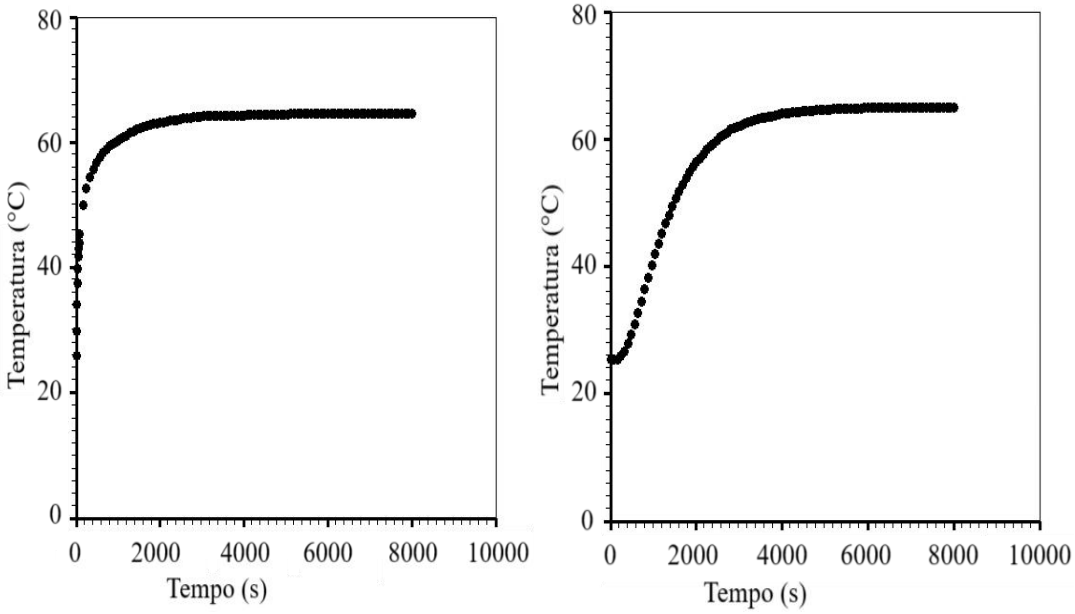
Na cinética de aquecimento apresentada na Figura 4.2(a), com o termopar fixado na superfície interna da parede do recipiente, observa-se que a temperatura inicial aumenta gradualmente, como esperado para a condição de contorno de primeiro tipo, mas não atinge imediatamente a temperatura externa. A temperatura passa de 27,7 °C para aproximadamente 65,0 °C, estabilizando-se em torno de 65,1 °C, com pequenas oscilações mantidas até o final do processo.

O gráfico da Figura 4.2(b), referente ao termopar posicionado no centro do recipiente, mostra que a temperatura inicial de 25,1 °C eleva-se de forma progressiva, atingindo a temperatura de equilíbrio de 65,0 °C. Em seguida, observa-se um pequeno aumento, chegando a 65,1 °C, mantendo-se estável com apenas pequenas variações até o término do processo.

A Figura 4.3 ilustra a cinética de penetração do calor no recipiente contendo polpa de graviola durante a pasteurização GR3, com termopares posicionados na borda e no centro do recipiente. Os gráficos mostram o comportamento do aquecimento em

ambas as regiões, permitindo a análise da evolução térmica ao longo do processo. Os valores coletados estão registrados nas Tabelas B.5 e B.6 do Apêndice B.

Figura 4.3: Representação GR3 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro)



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

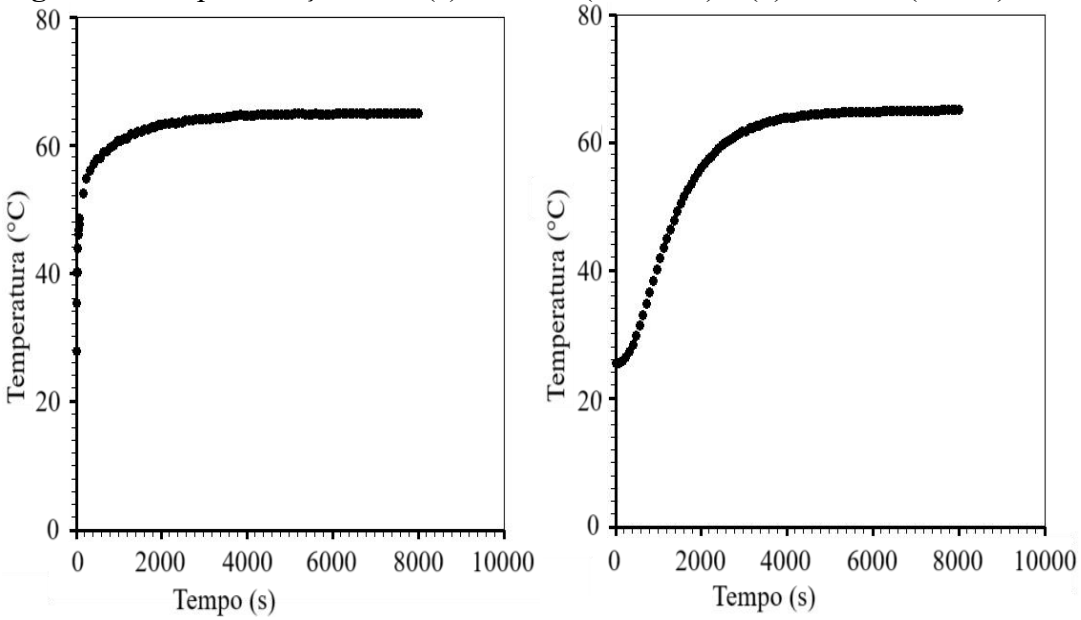
No gráfico da Figura 4.3(a), referente à borda interna, observa-se que a temperatura inicial de 25,9 °C aumenta gradualmente, atingindo 64,6 °C após 8881 s do início do processo. Já na Figura 4.3(b), correspondente ao centro do recipiente, a temperatura inicial de 25,4 °C mantém-se praticamente constante por um breve período antes de subir de forma progressiva, alcançando 65,0 °C após aproximadamente 6321 s, valor que corresponde à temperatura de equilíbrio.

Após atingir essa condição, a temperatura centro geométrico do recipiente foi preservada por mais 30 minutos, permitindo que toda a amostra alcançasse uma estabilização térmica uniforme.

A cinética de aquecimento para a pasteurização GR4, tanto na borda quanto no centro do recipiente, está ilustrada na Figura 4.4. Os valores obtidos neste experimento são apresentados nas Tabelas B7 e B8, do Apêndice B.

Na Figura 4.4(a), que mostra os valores de temperatura na superfície interna do recipiente, verifica-se que a temperatura inicial de 27,8 °C eleva-se de forma gradual, alcançando aproximadamente 65,0 °C em 6961 segundos desde o início da pasteurização.

Figura 4.4: Representação GR4 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro).



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

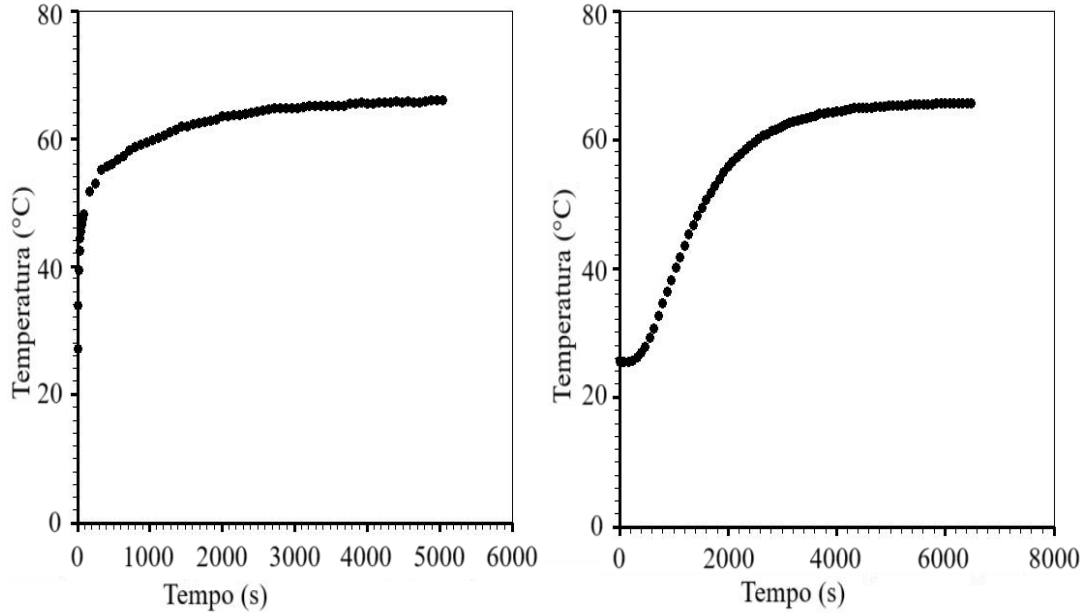
A Figura 4.4(b), referente ao termopar posicionado no centro geométrico do recipiente, demonstra a evolução da temperatura da amostra ao longo do processo de aquecimento. Observa-se que a temperatura inicial da polpa, de 25,5 °C, aumentou gradativamente até atingir a condição de equilíbrio térmico em aproximadamente 65,0 °C, após cerca de 6961 segundos desde o início do experimento. Esse comportamento evidencia a transferência de calor do meio aquecedor para o interior da amostra, sendo o centro do recipiente considerado o ponto menos favorecido termicamente devido à maior dificuldade de aquecimento nessa região.

Assim como observado nos experimentos anteriores, após o centro da amostra atingir a temperatura de equilíbrio de 65 °C, o processo de pasteurização foi mantido por mais 30 minutos, com o objetivo de garantir maior uniformidade térmica e eficiência do tratamento. Durante esse período, a temperatura permaneceu praticamente constante, estabilizando-se em torno de 65,2 °C.

Na Figura 4.5 são apresentados os gráficos da cinética de aquecimento referentes à pasteurização GR5, nos quais é possível observar o comportamento térmico tanto na superfície interna do recipiente quanto no centro geométrico da amostra. A análise desses perfis térmicos permite avaliar a distribuição de temperatura ao longo do processo e a eficiência da transferência de calor no sistema estudado. Os

valores experimentais obtidos nessas análises estão apresentados nas Tabelas B9 e B10 do Apêndice B.

Figura 4.5: Representação GR5 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro).



(a) (b)

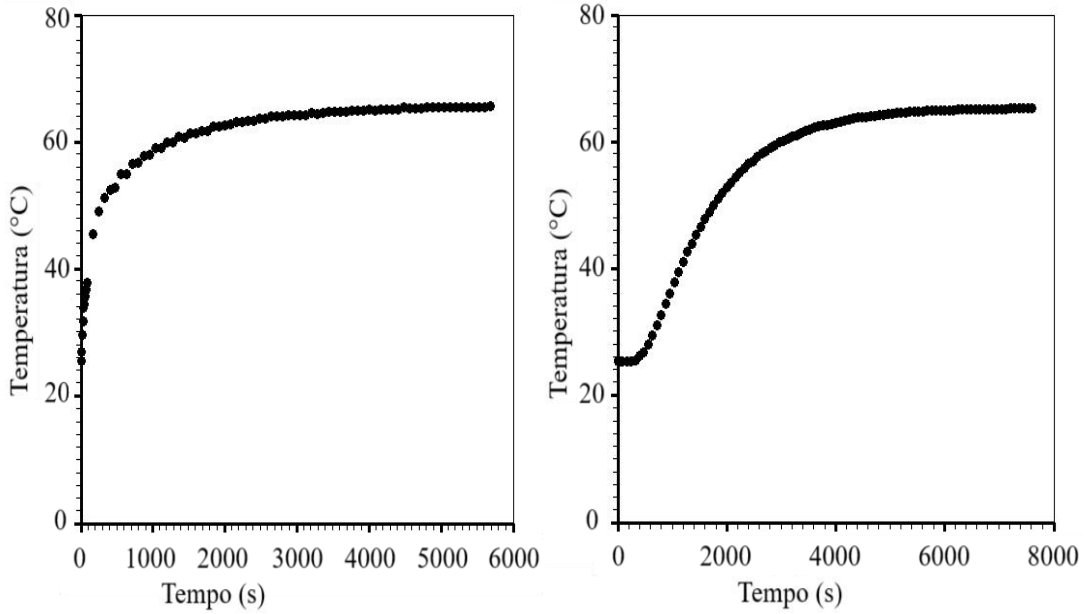
Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o perfil de temperatura apresentado na Figura 4.5, observa-se que, na Figura 4.5(a), correspondente ao termopar posicionado na superfície interna do recipiente, a temperatura inicial de 27,1 °C aumenta gradualmente, não atingindo de forma instantânea a temperatura da borda. Esse comportamento ocorre devido às propriedades térmicas do vidro, que promovem um atraso na transferência de calor até que a temperatura se estabilize, alcançando aproximadamente 65,1 °C em 3201 segundos.

Na Figura 4.5(b), referente ao termopar localizado no centro do recipiente, verifica-se um aquecimento mais lento da amostra, com a temperatura inicial de 25,7 °C atingindo 65,0 °C em 4641 segundos. Esse comportamento é esperado, pois a região central representa o ponto termicamente menos favorecido durante o processo de aquecimento. Assim como nos experimentos anteriores, após o centro da amostra atingir a temperatura de equilíbrio de 65 °C, o aquecimento foi mantido até a estabilização térmica do sistema, garantindo a conclusão adequada do processo de pasteurização.

Os gráficos apresentados na Figura 4.6 ilustram o comportamento da cinética de aquecimento durante a pasteurização GR6, com termopares posicionados na borda e no centro do recipiente. Os dados experimentais obtidos estão apresentados nas Tabelas B11 e B12 do Apêndice B.

Figura 4.6: Representação GR6 (a) sensor 1 (contorno) e (b) sensor 2 (centro).



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

A análise dos perfis térmicos apresentados na Figura 4.6 permite compreender o comportamento da transferência de calor e a evolução da cinética de aquecimento durante o processo de pasteurização. Na Figura 4.6(a), referente à região da borda interna do recipiente, observa-se que a temperatura inicial de aproximadamente 25,6 °C, próxima à temperatura ambiente, eleva-se gradualmente até atingir valores próximos de 65,0 °C. Esse comportamento está relacionado ao mecanismo predominante de condução térmica através das paredes do recipiente de vidro, material que apresenta menor condutividade térmica quando comparado a materiais metálicos. Como consequência, ocorre maior resistência ao fluxo de calor, promovendo aquecimento progressivo e uma distribuição térmica inicialmente não uniforme nas regiões periféricas do sistema.

Na Figura 4.6(b), correspondente ao termopar posicionado no centro do recipiente, verifica-se que a temperatura inicial de aproximadamente 25,5 °C aumenta continuamente até alcançar cerca de 65,0 °C, valor característico do processo de

pasteurização. Após essa etapa, observa-se a estabilização térmica em torno de 65,2 °C, indicando que o calor transferido pelas paredes do recipiente e distribuído por convecção natural no interior da amostra tornou-se suficiente para promover a uniformização térmica. Essa condição de equilíbrio térmico é essencial para a eficiência da pasteurização, pois garante que toda a amostra seja submetida a temperaturas adequadas para a redução da carga microbiológica, preservando simultaneamente suas propriedades físico-químicas e sensoriais. Assim, os perfis térmicos demonstram a importância do controle do aquecimento e da adequada distribuição de calor para a condução segura e eficiente do processo.

4.4 Média das Pasteurizações

Os valores de temperatura ao longo do contorno cilíndrico e do centro da amostra, obtidos por meio de um sensor instalado na interface do material, estão apresentados nas tabelas B.13 e B.14 do (Apêndice B).

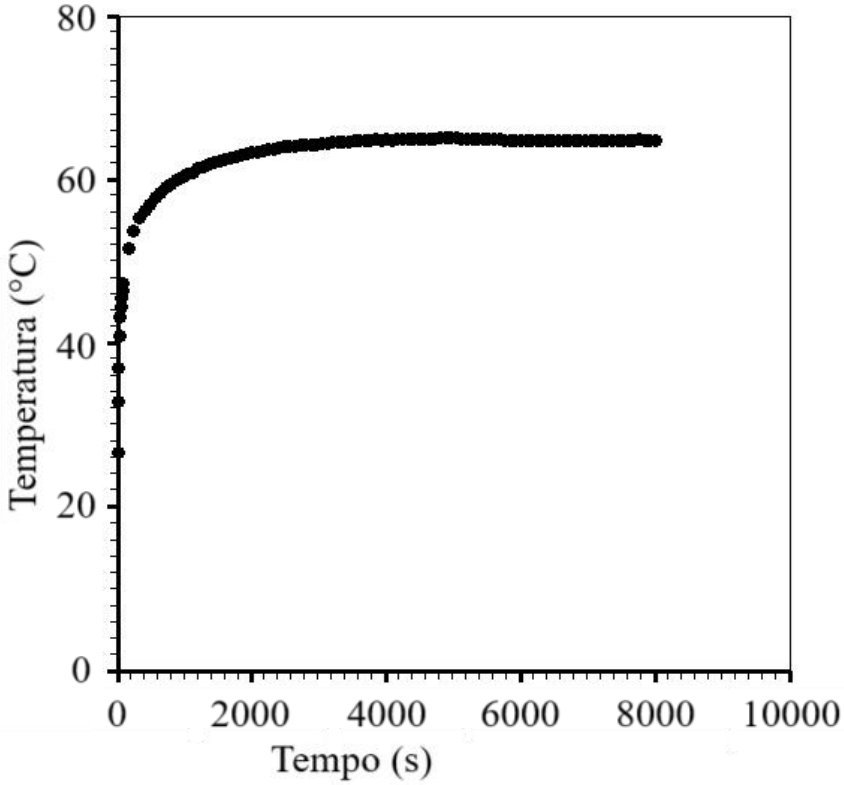
Com base nos dados obtidos em seis ensaios de pasteurização, foi determinada a média aritmética das temperaturas registradas em cada instante experimental, com o objetivo de reduzir possíveis variações individuais e aumentar a confiabilidade dos resultados. Os valores médios obtidos foram utilizados na construção dos gráficos da cinética de penetração de calor, apresentados a seguir, permitindo uma análise mais representativa do comportamento térmico do sistema durante o processamento.

Os gráficos apresentam a evolução da temperatura tanto no centro quanto na borda interna do recipiente, considerando a média das seis pasteurizações realizadas. Observa-se, na Figura 4.7, o aumento progressivo da temperatura ao longo do processo, partindo de uma condição inicial de aproximadamente 26,6 °C até atingir valores próximos de 65,0 °C, característicos da etapa de pasteurização. Esse comportamento evidencia um aquecimento gradual e controlado, favorecendo a distribuição uniforme do calor no interior da amostra.

A estabilização da temperatura próxima ao valor de processamento térmico indica que o sistema atingiu condições adequadas para a manutenção do tratamento

térmico, contribuindo para a eficiência da pasteurização e para a garantia da segurança microbiológica do produto analisado.

Figura 4.7: Média dos 6 experimentos (no contorno).

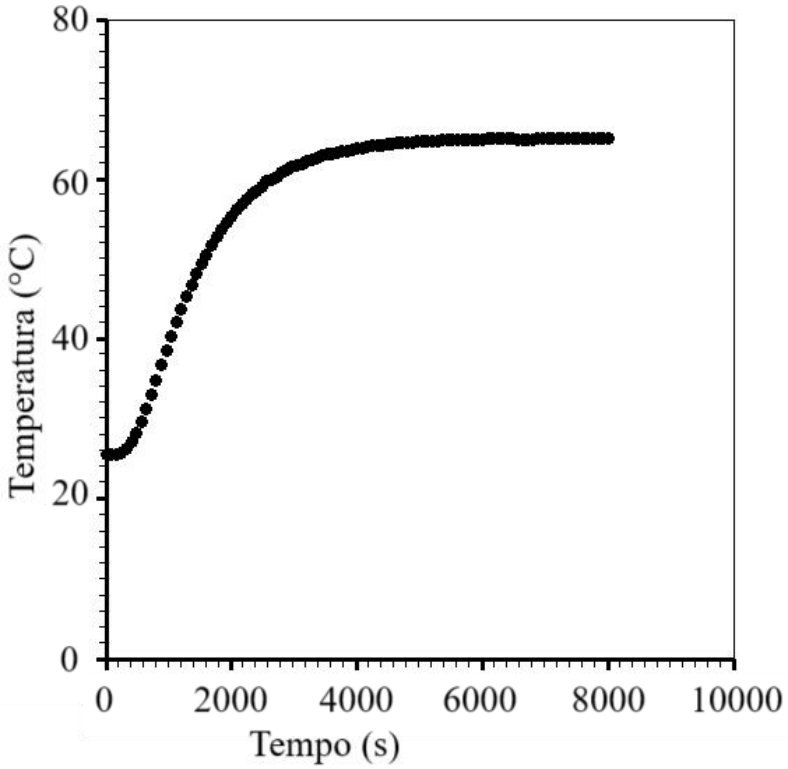


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a temperatura de processamento não é alcançada de forma imediata, comportamento associado às propriedades térmicas do recipiente utilizado, constituído de vidro, material que apresenta menor condutividade térmica e, consequentemente, maior resistência à transferência de calor. Durante essa etapa do aquecimento, a medida que o sistema se aproxima das condições de pasteurização pequenas variações nos valores de temperatura são registradas, as quais diminuem progressivamente até o estabelecimento da condição de equilíbrio térmico.

Na Figura 4.8, a curva que representa as médias das temperaturas registradas pelo termopar no centro geométrico da amostra apresenta variação ao longo do tempo. Durante esse intervalo, a temperatura atinge um valor que indica que toda a amostra alcançou o equilíbrio térmico. Esse fato sugere que o calor leva um tempo maior para atingir o centro do cilindro do recipiente.

Figura 4.8: Média dos 6 experimentos (no centro).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.8, observa-se que a temperatura inicial do processo de pasteurização, de 25,5°C, permanece praticamente constante por 241 segundos (4 minutos e 1 segundo), apresentando pequenas variações em torno desse valor durante esse intervalo. Posteriormente, a temperatura aumenta gradativamente até atingir 65,0°C, valor correspondente ao equilíbrio térmico, após aproximadamente 5681 segundos. Após mais 30 minutos, a temperatura de equilíbrio estabiliza-se em 65,2°C.

Ao analisar os gráficos representativos da cinética de penetração de calor, obtidos com o termopar posicionado no centro do recipiente, observa-se que o comportamento médio das seis pasteurizações realizadas é semelhante ao observado em cada experimento individual. Esse resultado indica que o processo apresentou um padrão consistente de aquecimento ao longo das repetições.

As curvas correspondentes às temperaturas medidas no contorno e no centro geométrico da amostra apresentam variações ao longo do tempo. Observa-se que, embora toda a amostra atinja o equilíbrio térmico, o calor leva mais tempo para alcançar o centro do recipiente, evidenciando a presença de um gradiente de

temperatura entre a região externa e a região central durante o processo de aquecimento.

4.5 Soluções numéricas: interface gráfica dos *softwares* e validações das soluções numéricas.

As soluções numéricas e o otimizador descritos no Capítulo 3 foram acoplados ao *software* desenvolvido com interface gráfica, o qual será descrito a seguir.

4.5.1 Estudo da malha

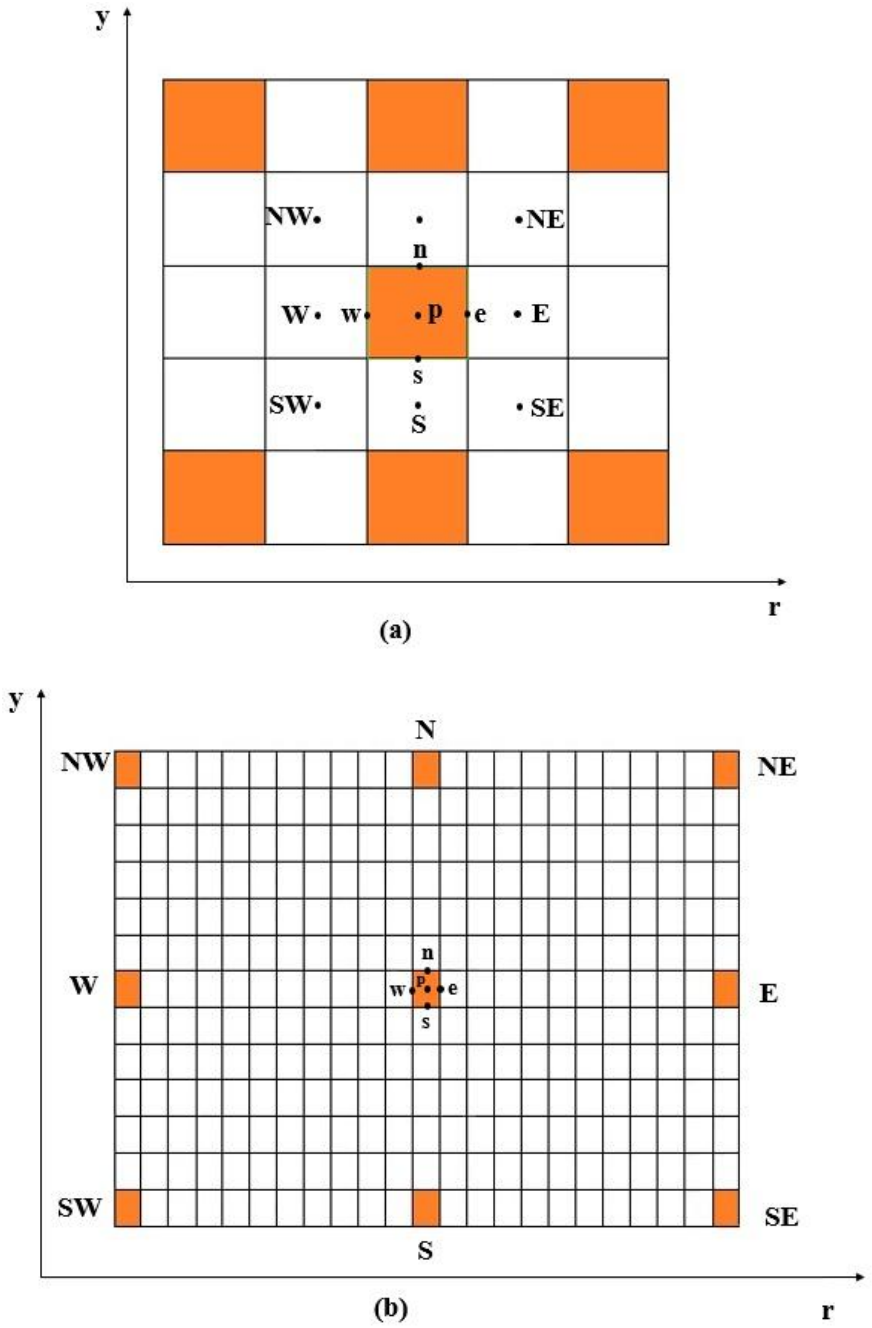
Para a solução numérica da equação de difusão, foi necessária a discretização da geometria do problema por meio da geração de uma malha computacional. Esse processo consiste em dividir o domínio físico em pequenos volumes de controle, permitindo que a equação diferencial seja resolvida numericamente em regiões discretas do sistema. A implementação do modelo numérico requer a definição de parâmetros fundamentais para a resolução do problema difusivo, como as dimensões da malha, o número de volumes de controle, as propriedades físicas do meio e as condições de contorno adotadas no processo. Essas definições possibilitam a aplicação da modelagem matemática em um código computacional, permitindo a resolução da equação de difusão em coordenadas cilíndricas e a obtenção da distribuição de temperatura ao longo do domínio analisado.

Inicialmente, foi empregada uma malha bidimensional composta por 5 linhas e 5 colunas, totalizando 25 volumes de controle, conforme ilustrado na Figura 4.9(a). Essa malha foi utilizada como etapa preliminar para verificar o funcionamento do modelo numérico, avaliar a implementação computacional e analisar o comportamento inicial da solução obtida. Apesar de apresentar menor refinamento espacial, essa configuração permitiu observar o comportamento térmico do sistema e validar a metodologia empregada.

Posteriormente, realizou-se o refinamento da discretização espacial, resultando em uma malha bidimensional de 25 x 25, composta por 625 volumes de controle, apresentada na Figura 4.9(b). O aumento do número de volumes de controle

proporcionou uma representação mais detalhada da geometria e da distribuição de temperatura no interior do domínio, contribuindo para o aumento da precisão da solução numérica. Dessa forma, a malha 25 x 25 foi adotada como configuração final deste trabalho por apresentar resultados mais consistentes e maior confiabilidade na simulação do fenômeno difusivo.

Figura 4.9: (a) Malha no domínio físico destacando o ponto nodal e suas fronteiras. (b)Representação da malha no domínio computacional.



Fonte: Autoria Própria

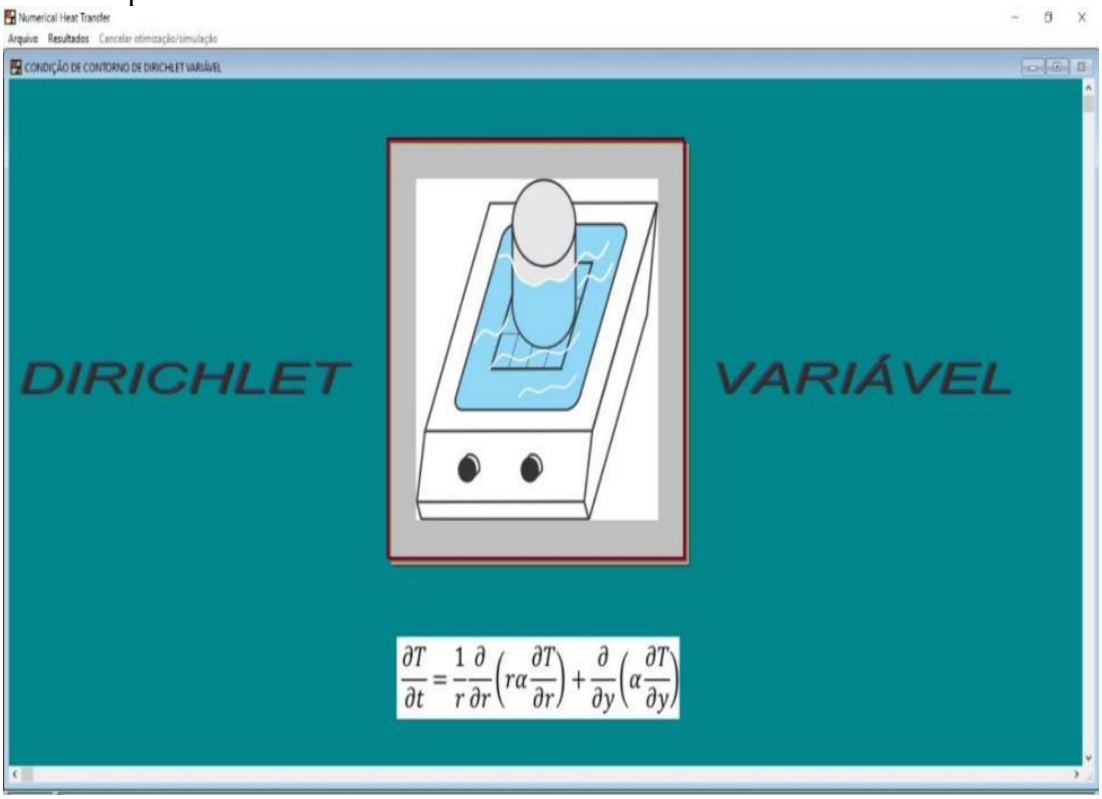
O refinamento proporcionou maior precisão na representação dos gradientes térmicos e maior estabilidade numérica, sendo consideradas 1000 passos de tempo (time steps) para a execução das simulações.

4.5.2 Interface Gráfica

A interface gráfica do *software* que utiliza a solução numérica da equação de difusão bidimensional em coordenadas cilíndricas tem aparência mostrada na Figura 4.10.

A interface gráfica do *software* Numerical Heat Transfer foi projetada de forma a facilitar o acesso e o uso pelo usuário. No próximo item, serão descritos os menus da interface gráfica.

Figura 4.10: Tela principal do *software* Numerical Heat Transfer desenvolvido para otimizar a transferência de calor com condição de contorno do primeiro tipo.

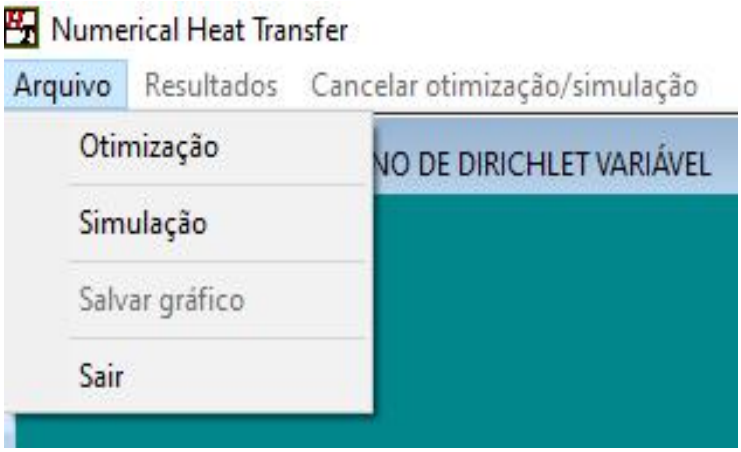


Fonte: Autoria própria.

4.5.3 Menu “Arquivo”

A Figura 4.11, mostra o menu “Arquivo” quando ele é selecionado.

Figura 4.11: Menu “Arquivo”.



Fonte: Autoria própria.

Ao acessar o menu “Arquivo”, o usuário visualizará quatro opções: “Otimização”, “Simulação”, “Salvar gráfico” e “Sair”. A opção “Salvar gráfico” ficará habilitada apenas após a finalização da otimização e da simulação, permitindo que o usuário guarde o gráfico gerado.

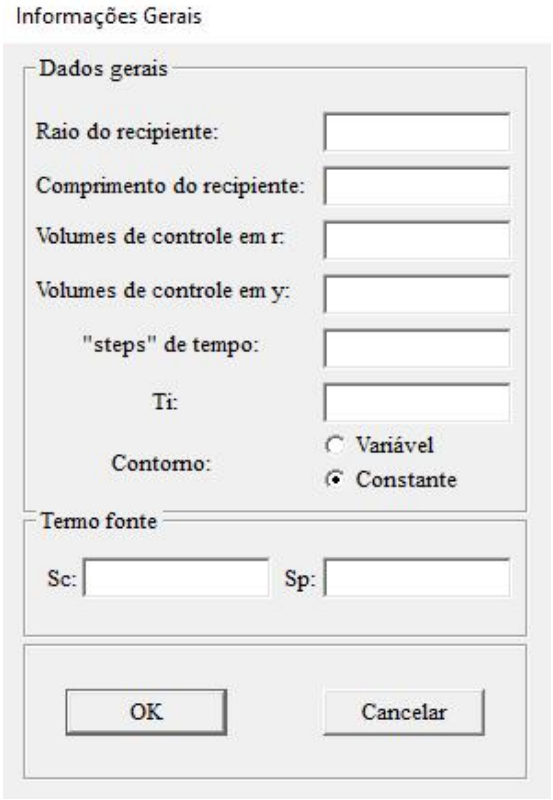
4.5.4 Item “Otimização”

Ao selecionar a opção “Otimização”, o *software* abre automaticamente o arquivo “exp.txt”, no qual devem ser inseridos os dados experimentais utilizados no processo de ajuste do modelo numérico. Esse arquivo serve como base para a comparação entre os resultados simulados e os dados obtidos experimentalmente, sendo fundamental para a calibração dos parâmetros do sistema.

Em seguida, é apresentada uma caixa de diálogo ao usuário para a inserção dos dados gerais necessários à etapa de otimização, incluindo parâmetros geométricos como o raio e o comprimento do domínio, além das informações relacionadas à discretização espacial (malha) e temporal (intervalos de tempo). Também são definidos a temperatura inicial do sistema, as opções de condições de contorno (constante ou

variável) e os coeficientes do termo fonte linearizado conforme é apresentada na Figura 4.12.

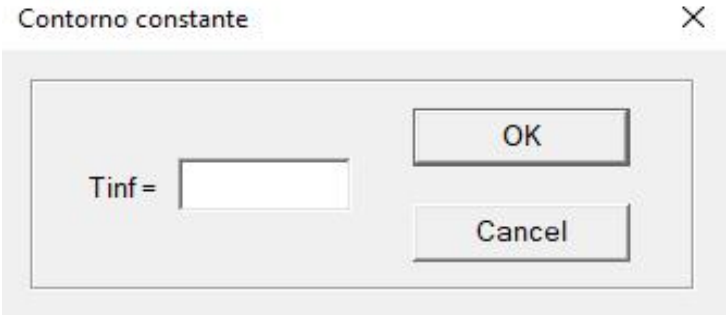
Figura 4.12: Caixa de diálogo para que sejam inseridos os dados gerais.



Fonte: Autoria própria.

Ao selecionar a opção contorno constante aparecerá uma caixa de diálogo para ser inserido o valor de temperatura de equilíbrio, como apresentado na Figura 4.13.

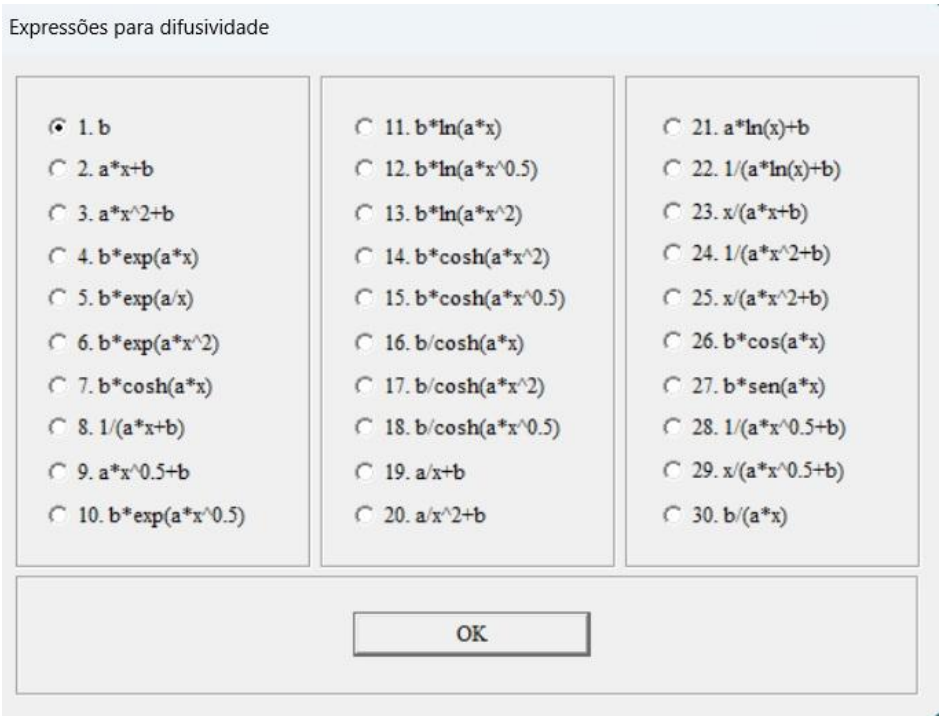
Figura 4.13: Caixa de diálogo para expressão de contorno constante.



Fonte: Autoria própria.

O *software* desenvolvido apresenta uma biblioteca com 30 expressões de difusividade, conforme mostrado na Figura 4.14. Após a inserção dos dados gerais necessários à otimização, o sistema exibe automaticamente a caixa de diálogo correspondente, na qual o usuário deverá escolher uma das expressões disponíveis para prosseguir com a análise.

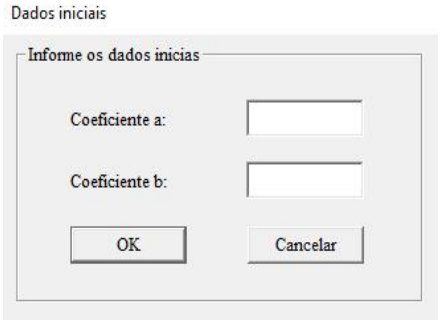
Figura 4.14: Caixa de diálogo para que seja escolhida uma expressão para a difusividade.



Fonte: Autoria própria.

Após escolher a expressão para a difusividade, para condições de contorno constante, uma última caixa de diálogo será aberta para a inserção dos dados iniciais, de acordo com a Figura 4.15.

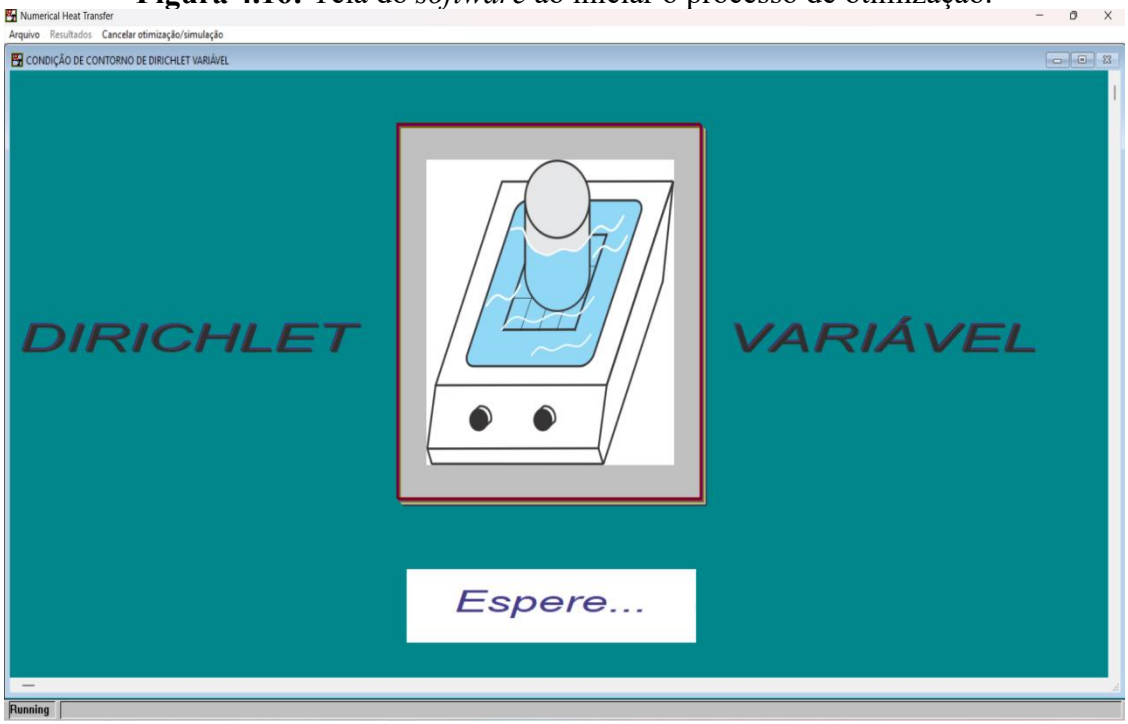
Figura 4.15: Dados iniciais para condições de contorno constante.



Fonte: Autoria própria.

Após o início do processo de otimização, é exibida na tela uma mensagem de "aguarde", indicando que o *software* está em execução e realizando os cálculos necessários. Essa etapa informa ao usuário que o processamento está em andamento e que nenhuma ação adicional é requerida até a conclusão do procedimento, conforme ilustrado na Figura 4.16.

Figura 4.16: Tela do *software* ao iniciar o processo de otimização.

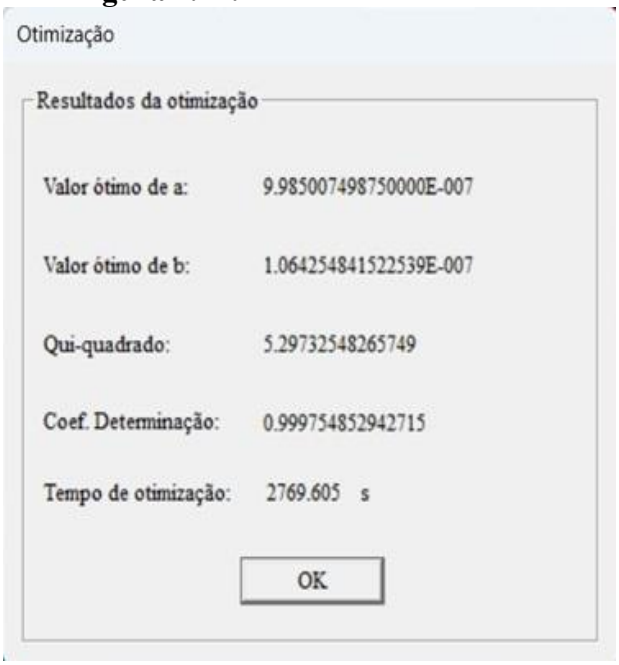


Fonte: Autoria própria.

O otimizador desenvolvido realiza a atualização contínua da minimização do erro, por meio do método dos mínimos quadrados, a cada iteração do processo. Durante essa etapa, o usuário possui a opção de interromper a execução a qualquer momento, por meio do menu "Cancelar otimização/simulação". Caso isso ocorra, os resultados parciais obtidos até o instante da interrupção são apresentados em uma caixa de diálogo, permitindo o acompanhamento do progresso da otimização.

Ao término do processo, uma caixa de diálogo é exibida com os resultados finais da otimização, contendo os valores ótimos dos parâmetros a e b, o valor da função objetivo representada pelo qui-quadrado (χ^2), o coeficiente de determinação (R^2) e o tempo total de execução da otimização, expresso em segundos, conforme ilustrado na Figura 4.17.

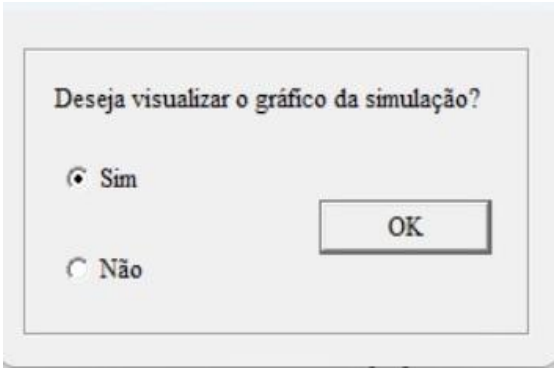
Figura 4.17: Resultados otimizados.



Fonte: Autoria própria.

Depois de clicar em "OK" na caixa de diálogo com os resultados, o usuário pode escolher se quer ou não ver o gráfico da simulação comparado com os dados experimentais (Figura 4.18).

Figura 4.18: Opções de visualização de gráfico.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, dois arquivos são gerados e podem ser acessados pelo menu "Resultados".

- **"centro.txt":** Neste arquivo encontram-se os valores obtidos para Φ ao longo do tempo.

- **“ótimo.txt”:** Neste arquivo estão todas as informações da otimização: número da expressão difusividade, o raio e o comprimento, os melhores valores dos parâmetros, o valor do qui-quadrado, o R^2, qual malha foi usada, os passos de tempo e quanto tempo a otimização levou no total.

O arquivo **“otimo.txt”** é mostrado na Figura 4.19.

Figura 4.19: Arquivo “otimo.txt” expressão para a difusividade e parâmetros ótimos

```
EXPRESSÃO PARA A DIFUSIVIDADE:           7

RAIO:
35.4E-3



COMPRIMENTO:
48.6E-3



                        PARÂMETROS ÓTIMOS

VALOR DO PARÂMETRO A:  9.999995000000623E-007
VALOR DO PARÂMETRO B:  1.213250214219928E-007
QUI-QUADRADO:   2.16426436351353
R^2:  0.999874770285985

                        DADOS FORNECIDOS

NÚMERO MÁXIMO DE ITERAÇÕES DO MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL:   1000.00000000000

MALHA:25X25

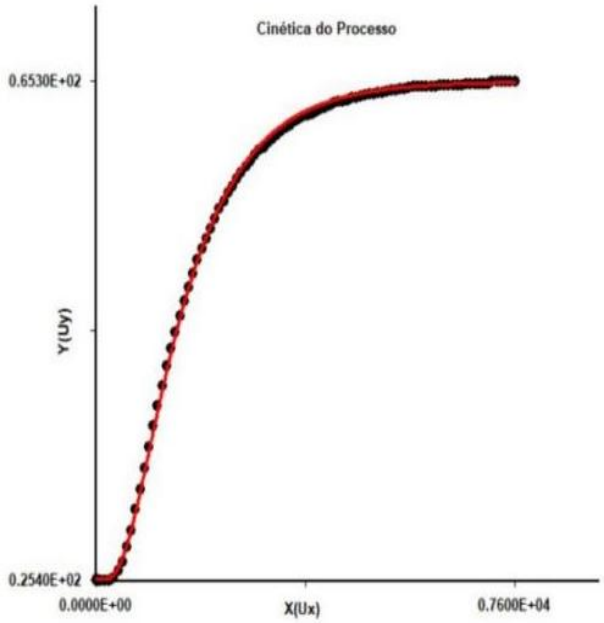
"STEPS" DE TEMPO:        1000

TEMPO DE OTIMIZAÇÃO:   1576.130     s
```

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, a Figura 4.20 mostra o gráfico gerado pela simulação comparado com os dados experimentais. Esse gráfico aparece quando o usuário escolhe visualizar os resultados após a otimização. Esse tipo de visualização ajuda a entender melhor a qualidade do ajuste feito pelo modelo.

Figura 4.20: Gráfico gerado pela simulação comparado com os dados experimentais.



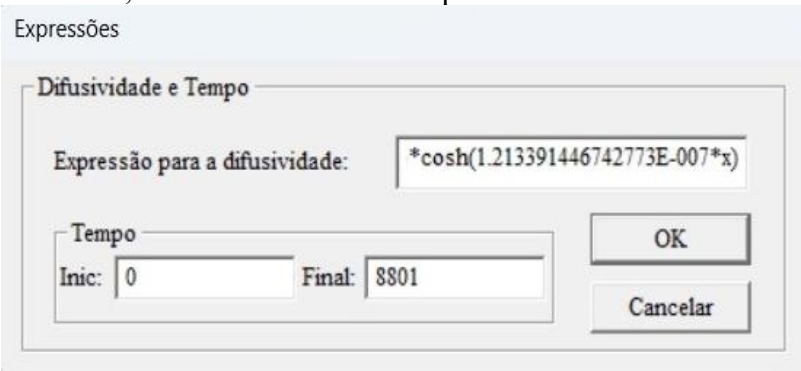
Fonte: Autoria própria.

4.5.5 Item “Simulação”

Quando o usuário já dispõe dos valores dos parâmetros termofísicos e da variável de interesse nos instantes inicial e de equilíbrio, é possível realizar simulações para diferentes configurações de malha e passos de tempo. Ao selecionar a opção “Simulação” no menu “Arquivo”, é exibida a primeira caixa de diálogo do processo, conforme ilustrado na Figura 4.21.

Nessa etapa, o usuário deve inserir as expressões matemáticas e valores fixos correspondentes ao raio, ao comprimento do domínio e à difusividade térmica, além dos valores associados ao termo fonte. Também são definidos os passos de tempo da simulação, os quais são utilizados para a geração das superfícies de temperatura ao longo do domínio. Dessa forma, torna-se possível analisar a evolução temporal da distribuição térmica no sistema, permitindo um acompanhamento mais detalhado do comportamento do campo de temperatura durante o processo de aquecimento.

Figura 4.21: Expressões (ou valores fixos) para o raio, o comprimento e a difusividade térmica, além dos valores correspondentes ao termo fonte.

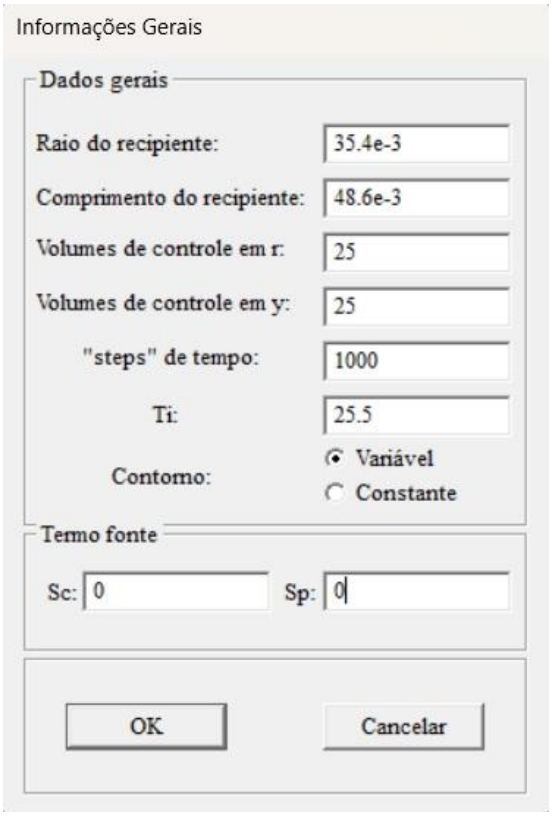


Fonte: Autoria própria.

Após as expressões serem informadas, uma caixa de diálogo será aberta para que sejam informados os dados gerais para a simulação, conforme Figura 4.22.

.

Figura 4.22: Informados os dados gerais para a simulação.

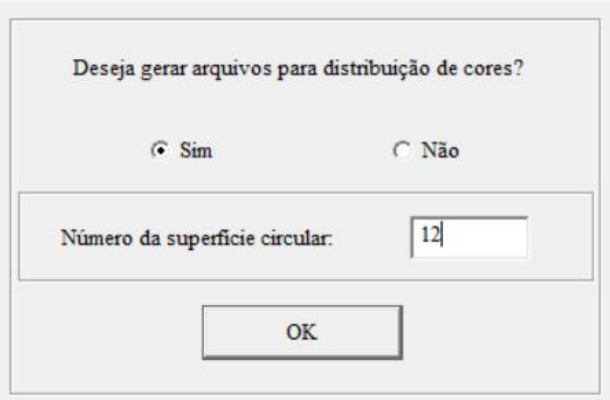


Fonte: Autoria própria.

Após o preenchimento da caixa de diálogo com os dados gerais, uma nova janela é exibida (Figura 4.23), permitindo ao usuário indicar se deseja gerar arquivos

de dados da simulação. Nessa etapa, é necessário especificar o número da superfície circular que se pretende gerar.

Figura 4.23: Gerar arquivos de dados da simulação

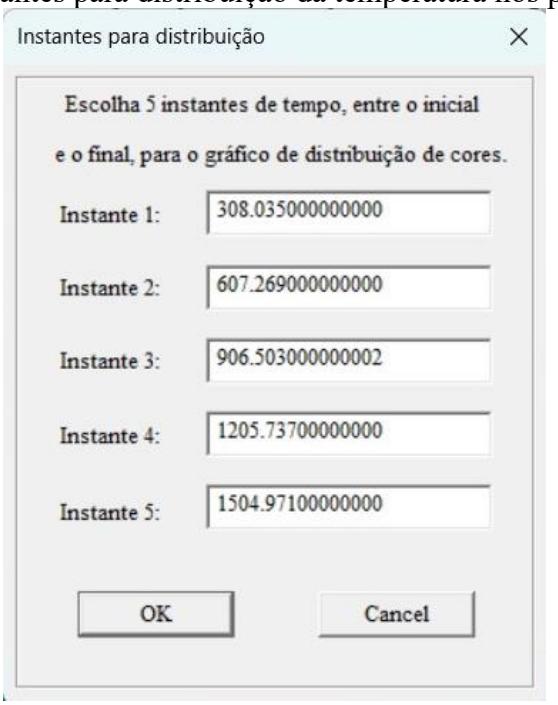


Fonte: Autoria própria.

Em seguida, uma nova interface é apresentada (Figura 4.24), na qual devem ser informados os instantes de tempo desejados para a geração dos arquivos. Essas informações são essenciais para a obtenção de resultados detalhados da simulação, possibilitando a criação de superfícies radiais de temperatura em diferentes momentos do processo.

.

Figura 4.24: Instantes para distribuição da temperatura nos planos escolhidos



Fonte: Autoria própria.

Ao final de uma simulação, o *software* desenvolvido gera os seguintes arquivos:

- **“centro.txt**”- Neste arquivo encontram-se os valores obtidos para Φ ao longo do tempo.
- **“Grid0.txt, Grid1.txt, Grid2.txt, Grid3.txt, Grid4.txt, Grid5.txt, Grid6.txt”**- Nestes arquivos encontram-se as coordenadas (x,y) das interseções das linhas da malha retangular geratriz do cilindro, em instantes determinados 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, respectivamente;
- **“Phi0.txt, Phi1.txt, Phi2.txt, Phi3.txt, Phi4.txt, Phi5.txt, Phi6.txt”**- Nestes arquivos encontram-se os valores de Φ em cada volume de controle da malha nos instantes: inicial (0); (1, 2, 3, 4, 5), escolhidos pelo usuário; e final (6).
- **“RADIAL0.txt, RADIAL 1.txt, RADIAL 2.txt, RADIAL 3.txt, RADIAL 4.txt, RADIAL 5.txt, RADIAL 6.txt”**- Nestes arquivos encontram-se os valores de Φ em cada volume de controle referente a superfície circular escolhida pelo usuário nos instantes: inicial (0); (1, 2, 3, 4, 5), escolhidos pelo usuário; e final (6).

4.6 Resultados e análises das otimizações para condição de contorno de Dirichlet constante

A difusividade térmica é uma propriedade física que descreve a rapidez com que o calor se propaga em um material, ou seja, a taxa de transferência de energia térmica de regiões com maior temperatura para regiões com menor temperatura. Esse parâmetro é fundamental na análise de processos de aquecimento e resfriamento, pois permite quantificar a velocidade de propagação do calor no interior dos materiais, sendo amplamente utilizado na modelagem de fenômenos de condução térmica (SILVA *et al.*, 2010; MACHADO, 2019).

Em situações nas quais um produto está sujeito à transferência de calor, ocorre uma variação espacial de temperatura. Nesse cenário, pode-se considerar a difusividade térmica aparente como uma função da temperatura local, α(T), com a finalidade de representar de forma mais realista o comportamento térmico do material

e proporcionar maior precisão na solução da equação de condução de calor (ATAÍDE, 2014; MACHADO, 2019).

Foram realizadas otimizações com o objetivo de analisar a cinética de penetração do calor no centro do recipiente, utilizando diferentes expressões crescentes para a difusividade térmica aparente da polpa de graviola em função da temperatura local.

Especificamente, foram aplicadas 6 funções disponíveis no código computacional desenvolvido, nas otimizações de cada experimento conduzido, visando representar de forma mais precisa o comportamento físico observado durante os ensaios. Ressalta-se que, em todas as otimizações, foi atribuído um valor inicial aos parâmetros relacionados à difusividade térmica bem como foram feitos analise de malha.

Os resultados obtidos podem ser mostrados em forma de tabelas e visualizados por meio de gráficos e/ou imagens que detalham a evolução da grandeza de interesse em função do tempo.

No presente trabalho, devido às simetrias radial e axial do recipiente utilizado, foi possível representar e simular apenas um quarto da geometria total. Essa simplificação geométrica é importante, pois reduz significativamente o custo computacional, tanto em termos de tempo de processamento quanto de alocação de memória, sem comprometer a representatividade física do modelo. As dimensões do recipiente e a imagem da base foram utilizadas como referência na construção da malha numérica empregada nas simulações.

O tempo médio necessário para a realização de cada processo de otimização foi de aproximadamente 32 horas, 31 minutos e 48 segundos, considerando a malha adotada e 1.000 passos de tempo. Esse elevado tempo de processamento está associado à complexidade do modelo numérico e ao refinamento da discretização temporal e espacial utilizados para garantir maior precisão dos resultados.

Os resultados obtidos nas diferentes otimizações referentes aos processos de pasteurização foram organizados em tabelas, classificadas por ordem crescente dos valores do qui-quadrado (χ^2), considerando que a função mais adequada é aquela que apresenta o menor valor de χ^2 e o maior coeficiente de determinação (R^2).

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 correspondem às seis expressões testadas pelo *software* para a difusividade térmica em função da temperatura local.

Tabela 4.2: Expressões testadas para a difusividade em função da temperatura local.

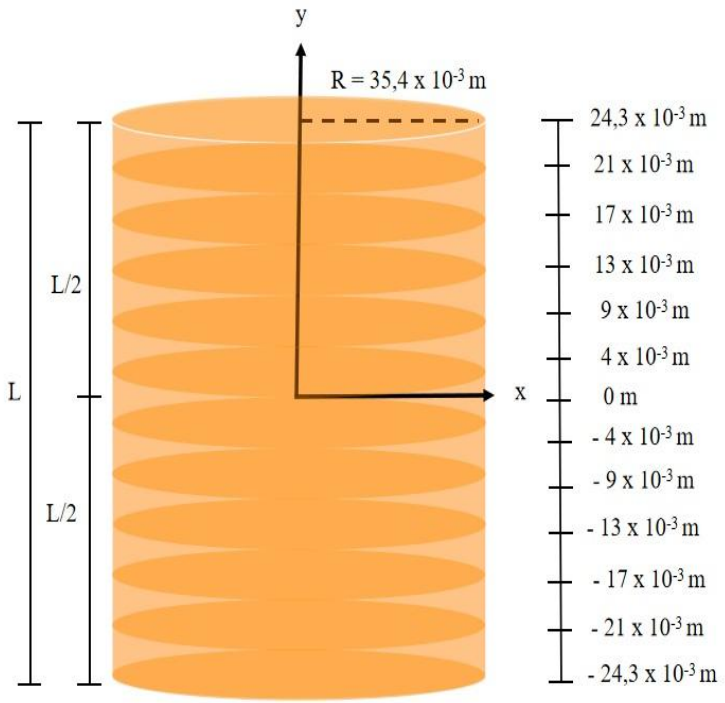
Identificação das funções (F)	Função para difusividade ($m^2\ min^{-1}$)
F1	$\alpha(T) = b$
F2	$\alpha(T) = be^{(a.T)}$
F3	$\alpha(T) = be^{(a.T^2)}$
F4	$\alpha(T) = b\cosh(a.T)$
F5	$\alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}$
F6	$\alpha(T) = b\cosh(a\sqrt{T})$

Fonte: Disponíveis no código computacional desenvolvido neste trabalho.

A integração do código-fonte ao *software* Numerical Heat Transfer também possibilitou a plotagem de curvas isotérmicas representando a cinética de penetração do calor no interior do recipiente. Essas curvas ilustram o comportamento da propagação térmica no centro do recipiente.

Na Figura 4.25, são apresentados, de forma esquematizada, os planos selecionados para a análise da distribuição de temperatura, considerando os valores individuais obtidos em cada experimento realizado.

Figura 4.25: Imagem dos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm)



Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que a imagem possui caráter ilustrativo e não se encontra em escala real. Os dados experimentais correspondentes a cada ensaio estão apresentados nas Tabelas B.1 a B.14, disponibilizadas no Apêndice B.

Foram escolhidos dois instantes de tempo para a análise da distribuição de temperatura nos diferentes planos. Um instante foi definido próximo ao início do processo, aos 7 minutos, e o outro aos 22 minutos após o início do aquecimento. Essa escolha permitiu observar o comportamento da temperatura em diferentes momentos do processo.

4.6.1 Estudo das expressões da difusividade térmica em função da temperatura no centro da amostra, considerando condição de contorno constante.

Neste trabalho, foram realizados estudos para selecionar a melhor expressão para representar a difusividade térmica em função da temperatura no centro da amostra de graviola, com base na análise dos resultados obtidos nos seis experimentos, considerando a condição de contorno constante. O objetivo foi analisar o comportamento térmico do sistema durante o processo de aquecimento. Essa análise permitiu verificar a consistência dos dados e identificar padrões na evolução da temperatura, além de ajudar na compreensão de como o calor se propaga para o interior da amostra ao longo do tempo.

4.6.2 Otimização para amostra GR1

Para a determinação da função que melhor representa a difusividade térmica aparente nesta experiência, foram utilizados os dados coletados pelo sensor 2 (centro) e apresentados na Tabela B.2 (em Apêndice B). Os resultados obtidos no processo de otimização são apresentados na Tabela 4.3, a qual classifica as funções de acordo com o desempenho na modelagem da difusividade térmica durante o processo de pasteurização da polpa de graviola, considerando-se como melhor ajuste aquele que apresenta o menor valor de χ^2 e o maior coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 4.3: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR1, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2)

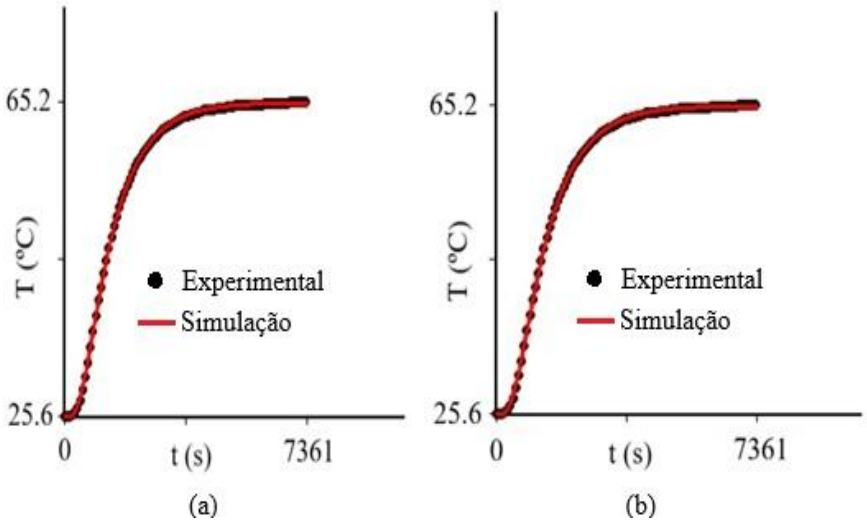
F	a	b	χ^2	R^2
$\alpha(T)=b$	0.00	1.2163×10^{-7}	2.052134	0.9998798940
$\alpha(T)=be^{(a.T)}$	1.2327×10^{-3}	1.1435×10^{-7}	2.256632	0.9998688238
$\alpha(T)=be^{(a.T^2)}$	7.3707×10^{-6}	1.1928×10^{-7}	2.088395	0.9998782580
$\alpha(T)=b\cosh(a.T)$	3.9188×10^{-3}	1.1921×10^{-7}	2.093704	0.9998779604
$\alpha(T)=be^{(a\sqrt{T})}$	2.0774×10^{-2}	1.0512×10^{-7}	2.403479	0.9998604971
$\alpha(T)=b\cosh(a\sqrt{T})$	1.0020×10^{-6}	1.2158×10^{-7}	2.052284	0.9998798946

Fonte: Autoria própria

A Tabela 4.3 indica que o valor de χ^2 obtido para a difusividade térmica aparente da polpa de graviola, quando representada pela função F6, apresenta o menor valor entre as cinco funções analisadas que consideram a difusividade como dependente da temperatura. Esse resultado indica que a função F6 proporciona o melhor ajuste aos dados experimentais, uma vez que o qui-quadrado está associado à medida do erro entre os valores simulados e experimentais. Além disso, essa mesma função apresenta o maior coeficiente de determinação (R^2) entre as seis funções avaliadas, o que reforça sua maior capacidade de representação do comportamento térmico do sistema, embora os demais modelos também tenham apresentado valores próximos, indicando ajustes satisfatórios de forma geral.

A Figura 4.26 apresenta a evolução da temperatura no centro do recipiente contendo a polpa de graviola, obtida por simulação numérica ao longo do tempo. Nessa comparação, são analisados dois modelos para a difusividade térmica: a função constante F1 = $\alpha(T) = b$ e da função F6 $= \alpha(T) = b\cosh\left(a\sqrt{T}\right)$, que considera a variação da difusividade com a temperatura. Em ambos os casos, também são apresentados os dados experimentais, representados por uma curva pontilhada, permitindo a comparação direta entre os resultados simulados e os valores observados experimentalmente. Essa análise evidencia a influência da forma funcional adotada para a difusividade térmica na capacidade do modelo em reproduzir com maior fidelidade o comportamento real do processo de aquecimento.

Figura 4.26: Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F6 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente.



Fonte: Autoria própria.

Da Tabela 4.3, observa-se que a difusividade térmica aparente da polpa da graviola é dada pela função $F6 = \alpha(T) = b\cosh\left(a\sqrt{T}\right)$, que vem a ser, entre as seis disponíveis, a melhor função de ajuste.

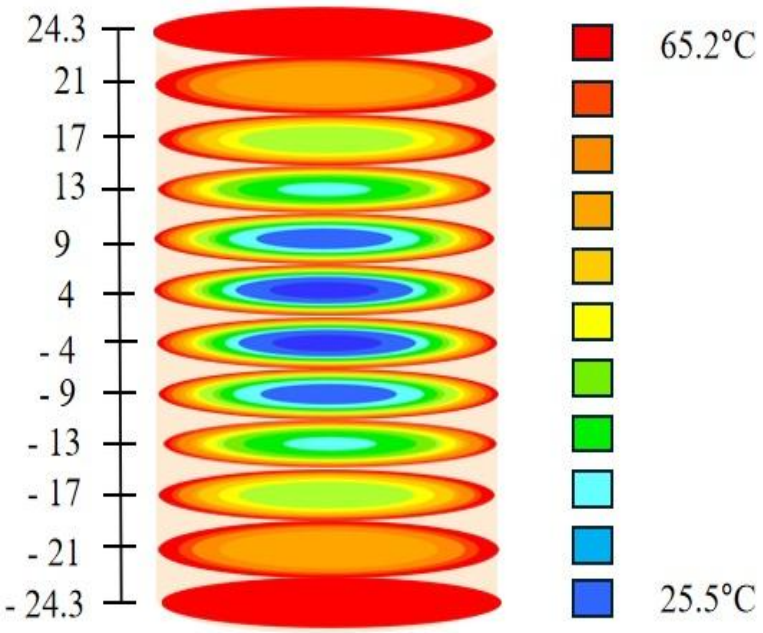
Nos gráficos das Figuras 4.26(a) e 4.26(b), correspondentes, respectivamente, à curva simulada pela expressão F6 para a difusividade térmica e à curva simulada pela função F1 com difusividade térmica constante. Observa-se comportamento bastante semelhante entre as curvas simuladas e os dados experimentais. Em ambos os casos, a evolução da temperatura ao longo do tempo é bem representada pelo modelo, com bom acompanhamento do aquecimento inicial e da posterior estabilização da temperatura.

4.6.3 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor

O perfil das curvas isotérmicas foi analisado em um mesmo instante de tempo (t = 7 minutos e 07 segundos), considerando seis planos distintos ao longo do processo de aquecimento. Para a construção dessas cinéticas térmicas, foi adotada a difusividade térmica constante. Observa-se que a propagação do calor ocorre da superfície externa do recipiente em direção ao centro da amostra, caracterizando um fluxo de calor radial.

Na Figura 4.27, verifica-se que o gradiente de temperatura, em qualquer região do domínio analisado, mantém uma distribuição com geometria semelhante à do corpo cilíndrico, indicando que o perfil térmico acompanha a forma física do sistema. Além disso, não foram observadas mudanças significativas na direção de propagação do calor durante o processo de aquecimento.

Figura 4.27: Contornos das isotérmicas da função $F6 = \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 07 segundos.



Fonte: Autoria própria.

A distribuição de temperatura ao longo do cilindro durante o processo de aquecimento, conforme ilustrado na Figura 4.27, permite a análise do comportamento térmico do material.

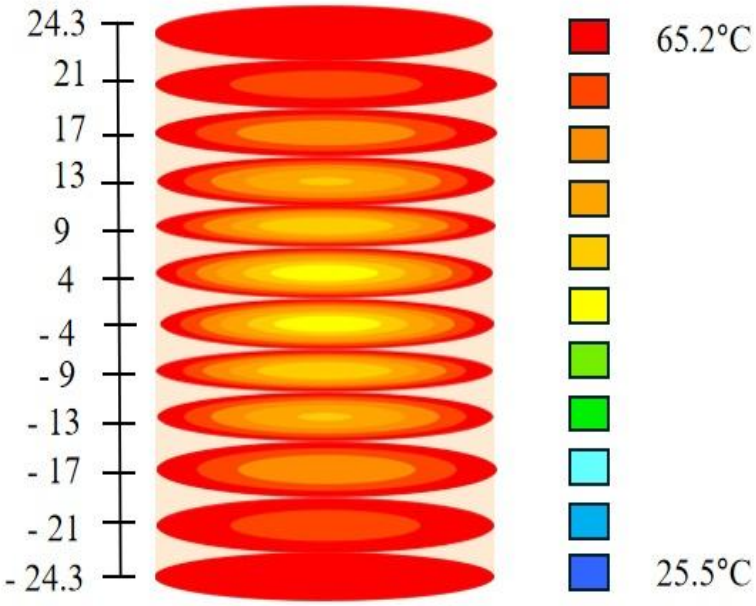
Observa-se que a propagação do calor ocorre da superfície externa para o interior do corpo, resultando em temperaturas mais elevadas nas regiões próximas ao contorno e valores progressivamente menores em direção ao centro, conforme indicado pela transição das cores quentes para as frias.

No centro do cilindro, observa-se que a temperatura permanece próxima àquela do início do processo, uma vez que essa região se encontra mais distante do contorno externo, onde a temperatura é imposta.

A Figura 4.28 apresenta as curvas isotérmicas correspondentes a seis planos distintos, analisadas em um mesmo instante de tempo (t = 22 minutos e 05 segundos) ao longo do processo de aquecimento.

Com o passar do tempo, a temperatura no centro do recipiente vai se aproximando da temperatura da maior parte do cilindro, mostrando que a diferença de temperatura diminui e que o calor tende a se distribuir de forma mais uniforme no interior do material.

Figura 4.28: Contornos das isotérmicas F6 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 05 segundos.



Fonte: Autoria própria.

4.6.4 Otimização para amostra GR2

Para encontrar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente nesta experiência, foram utilizados os dados coletados pelo sensor 2 (centro) e apresentados na Tabela B.4 (em Apêndice B). Utilizou-se as seis funções para estimar a difusividade térmica aparente em função da temperatura local.

As otimizações foram realizadas para uma amostra GR2, e os resultados encontram-se organizados na Tabela 4.4.

Considerou-se como melhor ajuste o modelo que apresentou o menor valor de χ^2 e o maior coeficiente de determinação r ajuste a função que apresentou menor valor de χ^2 e maior coeficiente de determinação (R^2), uma vez que esses parâmetros indicam, respectivamente, menor discrepância entre os dados experimentais e simulados e maior capacidade de explicação do modelo em relação ao comportamento observado. Com base nessa análise, foi possível identificar a função que melhor se adequou ao modelo proposto para a difusividade térmica aparente.

A Tabela 4.4 indica que o valor de χ^2 para a difusividade térmica aparente da polpa de graviola, quando representada pela função F2 = $\alpha(T) = be^{(aT)}$, apresenta o menor valor entre as seis funções analisadas. Além disso, essa função também apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos avaliados, embora todos tenham apresentado valores bastante próximos, o que evidencia um bom ajuste geral dos dados experimentais pelos diferentes modelos testados.

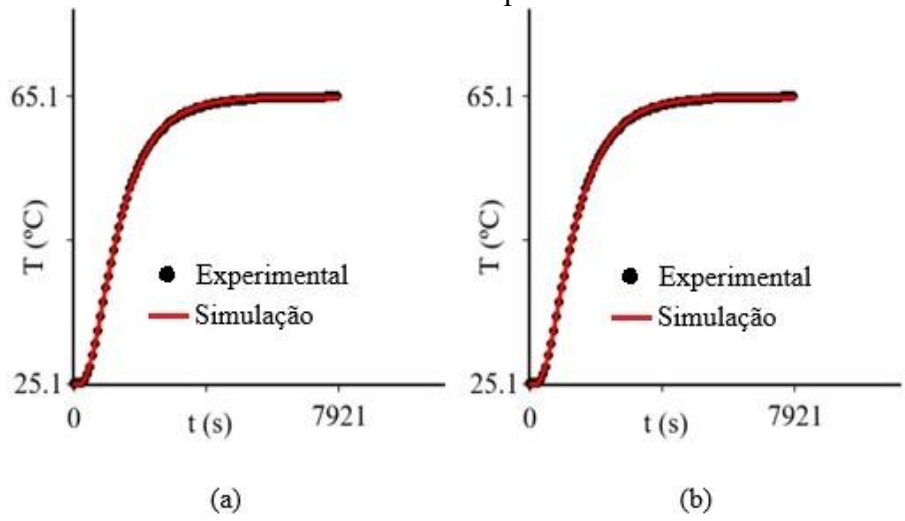
Tabela 4.4: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR2, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2).

F	a	b	χ^2	R^2
$\alpha(T) = b$	0.00	1.2262 x 10^{-7}	3.649069	0.9997862161
$\boldsymbol{\alpha(T) = be^{(a.T)}}$	**5.3876 x 10^{-4}**	**1.2063 x 10^{-7}**	**1.768485**	**0.9999187672**
$\alpha(T) = be^{(a.T^2)}$	9.9900 x 10^{-7}	1.0803 x 10^{-7}	8.200694	0,9996256280
$\alpha(T) = b\cosh(a.T)$	1.3894 x 10^{-4}	1.2300 x 10^{-7}	4.221625	0.9997555188
$\alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}$	1.0025 x 10^{-8}	1.2331 x 10^{-7}	4.191198	0.9997570878
$\alpha(T) = b\cosh(a\sqrt{T})$	1.0027 x 10^{-8}	1.2331 x 10^{-7}	4.191197	0.9997570873

Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.29 apresenta a cinética de aquecimento no centro do recipiente, obtida por simulação numérica. São comparados dois modelos para a difusividade térmica: a função constante F1= $\alpha(T) = b$ e da função F2 = $\alpha(T) = be^{(aT)}$, que considera a variação da difusividade em função da temperatura. Essa comparação permite avaliar a influência da forma funcional adotada para a difusividade térmica no comportamento da evolução da temperatura ao longo do processo de aquecimento.

Figura 4.29: Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F2 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se, nos gráficos apresentados, que os valores simulados apresentam boa concordância com os dados experimentais. As curvas geradas pelo modelo acompanham os pontos experimentais ao longo de todo o processo, mantendo comportamento semelhante. Essa proximidade indica que o modelo representa de forma adequada o comportamento térmico do sistema, demonstrando bom ajuste e confiabilidade nos resultados obtidos.

4.6.5 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor

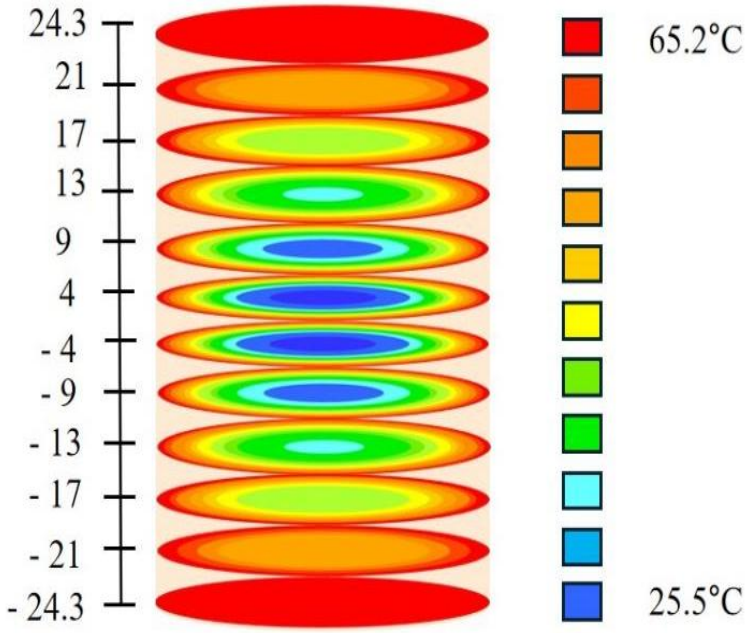
A Figura 4.30 apresenta as curvas isotérmicas correspondentes ao instante de 7 minutos e 07 segundos, analisadas em seis planos distintos do sistema. Essas curvas mostram como a temperatura está distribuída nesse instante específico do processo.

A partir dessa representação, é possível identificar as regiões mais quentes e mais frias. A avaliação em diferentes planos facilita a compreensão do comportamento térmico e da variação de temperatura no interior do sistema.

Conforme indicado na Figura 4.30, a temperatura predominante no centro do recipiente permanece próxima à temperatura inicial do processo. Essa condição se

mantém nos planos mais internos, evidenciando que o núcleo do material ainda não foi significativamente influenciado pela transferência de calor.

Figura 4.30: Contornos das isotérmicas da Função F2 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 07 segundos.



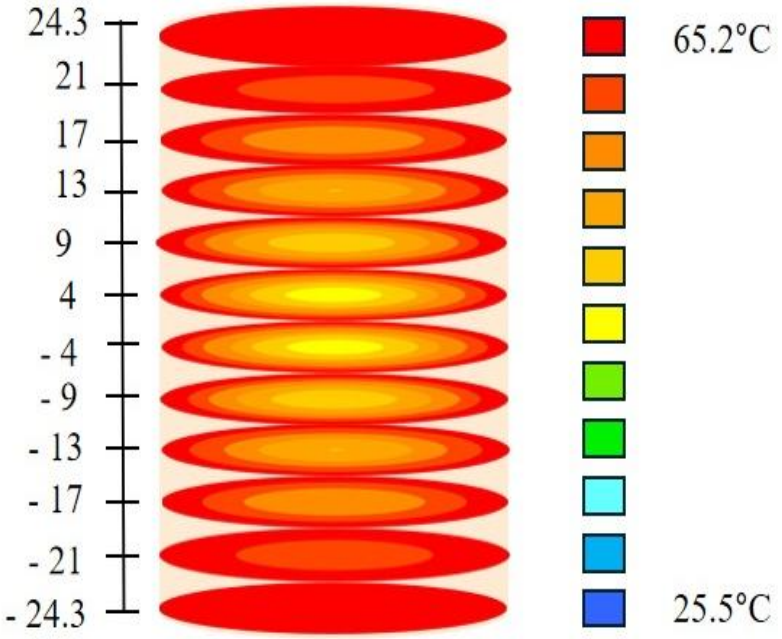
Fonte: Autoria própria.

À medida que são analisados planos localizados mais próximos ao contorno do sistema, observa-se um aumento progressivo da temperatura, evidenciando a propagação do calor a partir da superfície externa em direção às regiões internas do material. Esse comportamento indica a atuação do gradiente térmico ao longo do domínio, no qual a região externa exerce influência direta sobre as camadas mais internas, promovendo a transferência de energia térmica por condução.

Esse processo também evidencia a presença de diferenças de temperatura entre diferentes regiões do material durante a evolução temporal do aquecimento, caracterizando um regime transiente no qual o equilíbrio térmico ainda não foi completamente estabelecido.

A Figura 4.31 apresenta os contornos das curvas isotérmicas correspondentes ao instante de 22 minutos e 03 segundos, analisados em seis planos distintos do domínio, permitindo uma avaliação mais detalhada da distribuição espacial da temperatura no sistema.

Figura 4.31: Contornos das isotérmicas da Função F2 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 03 segundos.



Fonte: Autoria própria.

Nas curvas isotérmicas dos planos y = 4 mm e y = 21 mm, observa-se que, mesmo para instantes de tempo iguais, elas apresentam comportamentos distintos. No plano y = 21 mm, as curvas isotérmicas exibem gradientes de temperatura mais elevados, em razão de sua maior proximidade com a superfície do recipiente, onde a temperatura é imposta. Em contrapartida, no plano y = 4 mm, a temperatura ainda não atingiu o valor desejado, uma vez que essa região se encontra mais afastada do contorno e, portanto, sofre maior influência da resistência térmica do material, o que retarda a propagação do calor.

Para o instante de 22 minutos, as curvas isotérmicas passam a apresentar comportamentos praticamente semelhantes. Esse efeito é observado de forma mais evidente na comparação da simulação do cilindro nos planos de 9 mm e 13 mm, nos quais se verifica que os pontos da polpa da graviola já atingiram, ou estão muito próximos de atingir, a temperatura de equilíbrio térmico.

4.6.6 Otimização Para amostra GR3

Para encontrar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente nesta experiência, foram utilizados os dados coletados pelo sensor 2 (centro) e

apresentados na Tabela B.6 (em Apêndice B). Aplicou-se as seis funções para estimar a difusividade térmica aparente em função da temperatura local. As otimizações foram realizadas para uma amostra GR3, e os resultados encontram-se organizados na Tabela 4.5. Observa-se que a função que apresentou menor valor de χ^2 e maior coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 4.5: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR3, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2).

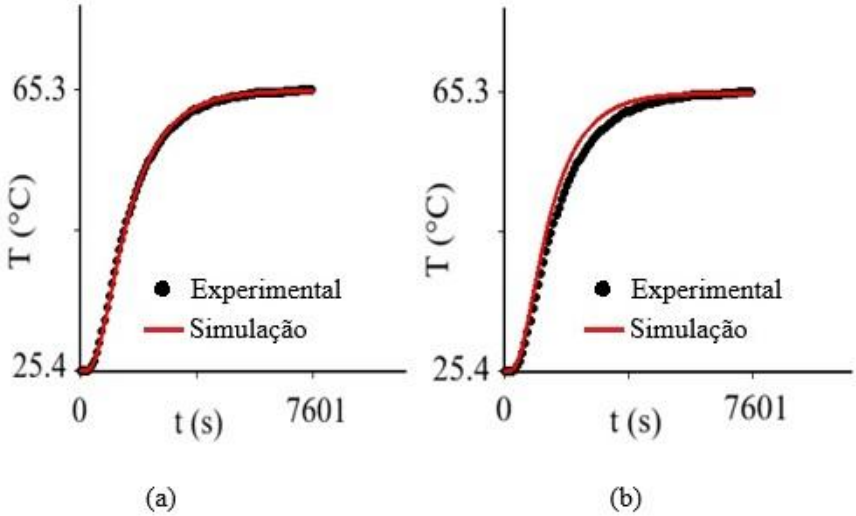
F	a	b	χ^2	R^2
$\alpha(T) = b$	0.00	1.2311×10^{-7}	7.861568	0.9995359615
$\alpha(T) = be^{(a.T)}$	1.8069×10^{-3}	1.1251×10^{-7}	7.748851	0.9995470931
$\alpha(T) = be^{(a.T^2)}$	1.9639×10^{-14}	1.0810×10^{-7}	5.926471	0.9997239013
$\alpha(T) = b\cosh(a.T)$	5.4619×10^{-3}	1.1849×10^{-7}	7.586731	0.9995555289
$\alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}$	1.0314×10^{-2}	1.1454×10^{-7}	7.479332	0.9995602190
$\boldsymbol{\alpha(T) = b\cosh(a\sqrt{T})}$	$\mathbf{9.9432 \times 10^{-9}}$	$\mathbf{1.0814 \times 10^{-7}}$	**5.926325**	**0.9997238947**

Fonte: Autoria própria.

Da Tabela 4.5, observa-se que os valores de χ^2 para a difusividade térmica aparente da polpa da graviola na experiência GR3, quando determinado pela função $\alpha(T)=b\cosh(a\sqrt{T})$ é o menor em comparação aos obtidos pelas demais funções. Além disso, os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2) foram obtidos pelas funções F6 e F3. No entanto, devido à proximidade entre os valores de R^2 apresentados pelos modelos, optou-se pela função F6, por apresentar o melhor ajuste aos dados analisados.

A Figura 4.32 apresenta os gráficos da cinética de aquecimento no centro do recipiente, obtidos por meio de simulações numéricas com difusividade térmica constante. Na Figura 4.32(a) é mostrado o resultado da simulação realizada com a função F6, enquanto na Figura 4.34(b) é apresentado o resultado obtido com a função constante $F1 = \alpha(T) = b$.

Figura 4.32: Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F6 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente.



Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos, as curvas vermelhas representam os resultados do aquecimento obtidos por meio da simulação numérica, enquanto as curvas pretas pontilhadas indicam a evolução da temperatura obtida experimentalmente, permitindo a comparação entre os valores simulados e os dados medidos ao longo do tempo.

O gráfico da Função 6, apresentado na Figura 4.32(a), mostra a variação da temperatura em função do tempo durante o processo de aquecimento. Observa-se que a curva simulada acompanha de forma bastante próxima o comportamento dos dados experimentais ao longo de todo o intervalo analisado, indicando boa concordância entre o modelo matemático e os resultados experimentais.

Por sua vez, no gráfico apresentado na Figura 4.32(b), referente à simulação realizada com a função F1, observa-se que no início do processo de aquecimento até um pouco mais da metade do tempo, existe uma diferença entre a curva experimental e a curva simulada. Nesse período a temperatura prevista pelo modelo apresenta valores ligeiramente superiores aos observados experimentalmente, fazendo com que a curva simulada se posicione acima da curva experimental. Só ao final do processo e que as curvas passam a se aproximar, mostrando que essa função não seria uma boa escolha para representar a difusividade termica no caso da amostra GR3.

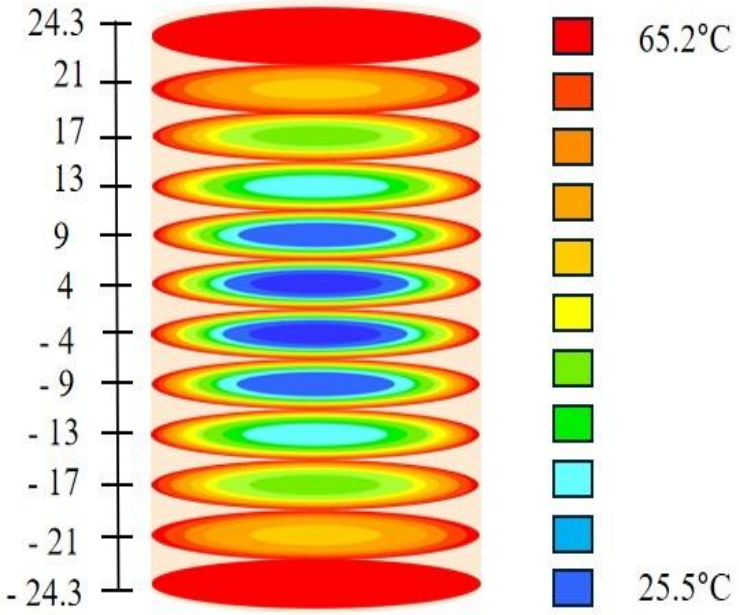
Diante desses resultados, conclui-se que a função F6 apresenta melhor ajuste aos dados experimentais, descrevendo de forma mais adequada o comportamento do processo de aquecimento analisado. Em contrapartida, a função F1 não apresentou um ajuste satisfatório em relação aos dados experimentais, evidenciando diferenças mais

significativas entre os valores simulados e os valores medidos. Dessa forma, a função F6 mostrou-se mais adequada para descrever o comportamento experimental do sistema.

4.6.7 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor.

A Figura 4.33 apresenta as curvas isotérmicas para um mesmo instante de tempo (t = 7 minutos e 07 segundos) em diferentes planos iniciais, obtidas a partir da modelagem do sistema em um cilindro.

Figura 4.33: Contornos das isotérmicas da Função F6 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 12 segundos.



Fonte: Autoria própria.

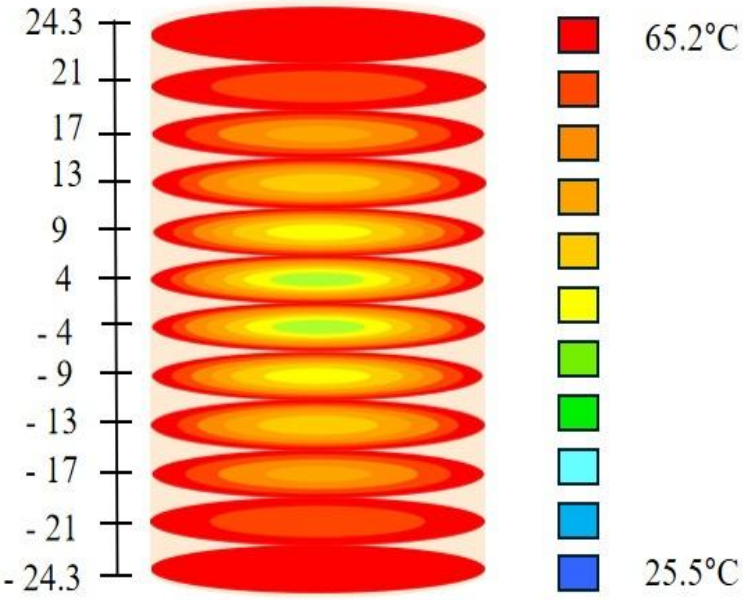
Os gráficos de contorno obtidos apresentam comportamento semelhantes às verificadas nas experiências 1 e 2, indicando a repetição do comportamento térmico. Os resultados mostram que o calor se propaga da superfície para o centro do recipiente, enquanto as curvas isotérmicas se expandem do centro em direção à superfície do cilindro, acompanhando o avanço do aquecimento no interior do material.

Observa-se diferença entre os contornos das curvas isotérmicas nos seis planos analisados, o que já era esperado do ponto de vista físico. Esse comportamento ocorre porque as isotérmicas dependem da posição do plano em relação ao centro do cilindro.

Aos 7 minutos do início do processo, conforme a Figura 4.33, nota-se que nos planos mais internos ainda há muitos pontos da polpa da graviola na temperatura inicial, enquanto no plano a y = 21 mm a temperatura já está próxima da temperatura desejada.

A Figura 4.34 apresenta os contornos das curvas isotérmicas nos seis diferentes planos para um mesmo instante de tempo (t = 22 minutos e 02 segundos) do processo.

Figura 4.34: Contornos das isotérmicas da Função F6 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola nos instantes de tempo: 22 minutos e 02 segundos.



Fonte: Autoria própria.

No instante de 22 minutos, representado na simulação da Figura 4.36, a diferença no comportamento das curvas isotérmicas no cilindro torna-se evidente, pois, no plano mais afastado do centro, praticamente todos os pontos da amostra da polpa da graviola já atingiram a temperatura de equilíbrio térmico, o que ainda não ocorre no plano central.

É interessante observar que para esse instante, além do plano central, os planos mais próximos a ele também estão com as temperaturas acima da temperatura

ambiente, e ainda não tenham atingido a temperatura de equilíbrio que para esta pasteurização, o valor e dado por T = 65 °C.

4.6.8 Otimização Para amostra GR4.

Para encontrar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente nesta experiência, foram utilizados os dados coletados pelo sensor 2 (centro) e apresentados na Tabela B.8 (em Apêndice B).

Aplicou-se as seis funções para estimar a difusividade térmica aparente em função da temperatura local. As otimizações foram realizadas para uma amostra GR4, e os resultados encontram-se organizados na Tabela 4.5. O desempenho da função foi avaliado por meio dos indicadores estatísticos χ^2 e R^2. Essa abordagem permitiu comparar os ajustes entre as diferentes funções.

A função que obteve o menor valor de χ^2 foi considerada a mais representativa para o fenômeno analisado.

A partir da Tabela 4.6, observa-se que, na experiência GR4, a função F4 = $\alpha(T) = b\cosh(aT)$ apresenta o menor valor de χ^2 para a difusividade térmica aparente da polpa de graviola. Essa função também obteve o maior R^2, embora os valores sejam muito próximos entre si.

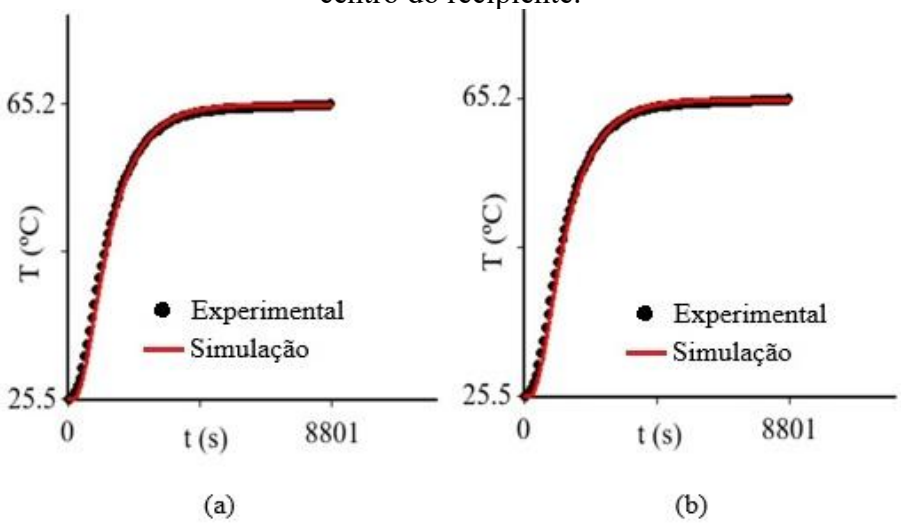
Tabela 4.6: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR4, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2).

F	a	b	χ^2	R^2
$\alpha(T) = b$	0.00	1.2187×10^{-7}	1.822079	0.9998937249
$\alpha(T) = be^{(a.T)}$	5.2097×10^{-13}	1.2117×10^{-7}	3.300560	0.9998524123
$\alpha(T) = be^{(a.T^2)}$	4.4877×10^{-6}	1.2569×10^{-7}	3.596047	0.9986242202
$\boldsymbol{\alpha(T) = b\cosh(a.T)}$	$\mathbf{7.8730 \times 10^{-8}}$	$\mathbf{1.2187 \times 10^{-7}}$	**1.822078**	**0.9998937322**
$\alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}$	1.0009×10^{-6}	1.2179×10^{-7}	1.822400	0.9998936433
$\alpha(T) = b\cosh(a\sqrt{T})$	1.0015×10^{-6}	1.2186×10^{-7}	1.822411	0.9998937246

Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.35 mostra os gráficos da cinética de aquecimento no centro do recipiente, obtidos pelas funções F4 (Figura 4.35(a)) e F1 (Figura 4.35(b)).

Figura 4.35: Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F4 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente.



Fonte: Autoria própria.

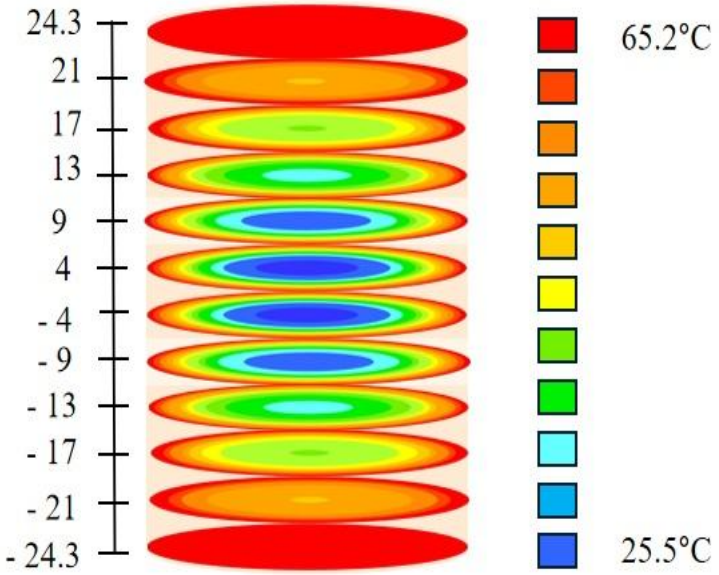
As linhas vermelhas mostram os resultados simulados, e as linhas pretas pontilhadas representam os dados experimentais. Observa-se que, na fase inicial do processo, os valores simulados apresentam uma pequena diferença em relação aos dados experimentais para ambas as funções F4 e F1.

À medida que o processo de aquecimento se desenvolve, os dados simulados se aproximam dos experimentais e se mantêm estáveis, demonstrando que as funções simuladas representam corretamente o comportamento térmico do sistema. Essa proximidade entre os resultados indica um bom ajuste do modelo utilizado. Além disso, evidencia que a simulação consegue descrever de forma adequada a evolução da temperatura ao longo do tempo.

4.6.9 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor.

As curvas isotérmicas para diferentes planos, no instante de 7 minutos e 02 segundos, são apresentadas na Figura 4.36. Essas curvas permitem observar a distribuição da temperatura no interior do sistema nesse momento do processo.

Figura 4.36: Contornos das isotérmicas da Função F4 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 02 segundos.



Fonte: Autoria própria.

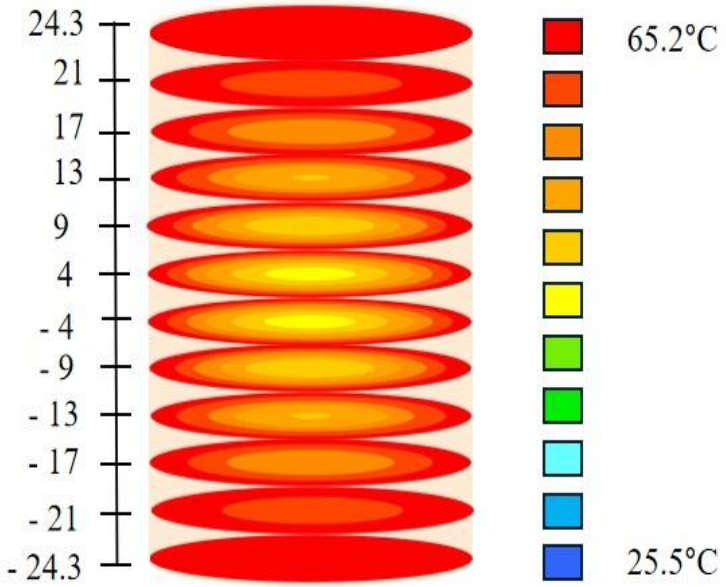
Observa-se que as curvas isotérmicas apresentam comportamento semelhante ao observado nas experiências anteriores, indicando que o calor tende a se propagar da superfície externa em direção ao centro do recipiente, enquanto as curvas isotérmicas se expandem gradualmente do interior para as regiões mais externas.

Verifica-se também que os pontos localizados no centro e nas regiões próximas a ele permanecem, em grande parte, próximos da temperatura inicial. Esse resultado indica que o aquecimento ocorre de forma gradual no interior do material, principalmente nas regiões mais afastadas da superfície aquecida.

Esse comportamento evidencia que o processo de transferência de calor ainda se encontra em fase inicial nessas regiões, fazendo com que a variação de temperatura no centro do recipiente seja menor quando comparada às regiões mais próximas ao contorno, onde o aquecimento ocorre de maneira mais rápida.

As curvas isotérmicas no instante de 22 minutos e 2 segundos são apresentadas na Figura 4.37, considerando os planos y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm. Essas curvas representam a distribuição de temperatura no interior do sistema nesse momento do aquecimento, permitindo observar como o calor se distribui nas diferentes regiões do material ao longo do processo.

Figura 4.37: Contornos das isotérmicas da Função F4 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola nos instantes de tempo: 22 minutos e 09 segundos.



Fonte: Autoria própria.

As curvas isotérmicas apresentam comportamentos distintos, para o mesmo instante de tempo. No plano y = 21 mm, verifica-se que os gradientes de temperatura são menos acentuados, em função da maior proximidade da superfície da amostra.

No plano y = 4 mm, próximo ao centro da amostra, ainda existem regiões que não atingiram a temperatura de equilíbrio térmico, devido à maior distância em relação às extremidades.

4.6.10 Otimização para a amostra GR5.

Para determinar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente nesta experiência, foram utilizados os dados coletados pelo sensor 2 (centro) e apresentados na Tabela B.10 (em Apêndice B), aplicou-se as seis funções para estimar a difusividade térmica aparente em função da temperatura local. As otimizações foram realizadas para uma amostra GR5, e os resultados da otimização são apresentados na Tabela 4.7.

Da análise da Tabela 4.7, observa-se que, na experiência GR5, os menores valores de χ^2 para a difusividade térmica aparente da polpa de graviola foram obtidos

tanto pela função F2 $= \alpha(T) = be^{(a\,T)}$ quanto pela função constante F1 $= \alpha(T) = b$, em comparação às demais funções avaliadas.

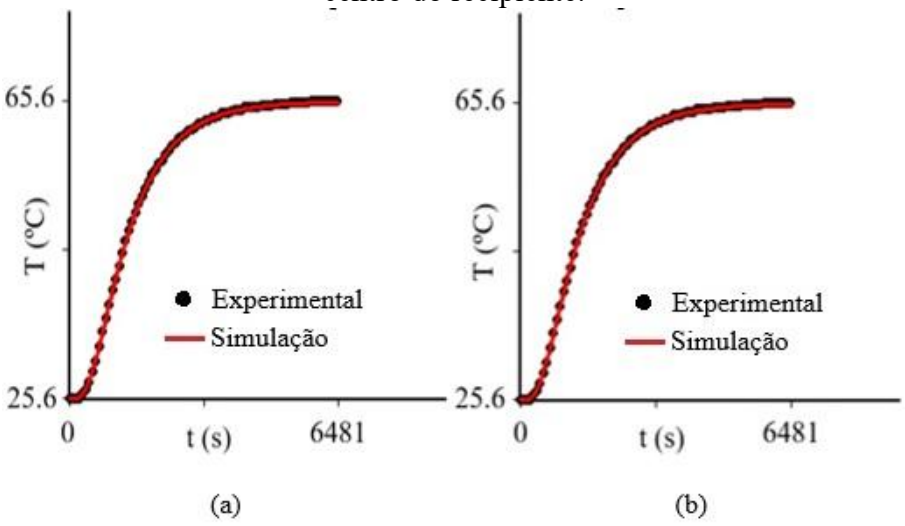
Tabela 4.7: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR5, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2)

F	a	b	χ^2	R^2
$\alpha(T) = b$	0.00	1.1943 x 10^{-7}	17.010224	0.9990340145
$\alpha(T) = be^{(a.T)}$	**3.2062 x 10^{-11}**	**1.1937 x 10^{-7}**	**17.010230**	**0.9990341469**
$\alpha(T) = be^{(a.T^2)}$	2.9025 x 10^{-13}	1.1943 x 10^{-7}	17.010235	0.9990339552
$\alpha(T) = b\cosh(a.T)$	5.4593 x 10^{-7}	1.1943 x 10^{-7}	17.010239	0.9990338964
$\alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}$	1.0009 x 10^{-6}	1.1938 x 10^{-7}	17.010442	0.9990341108
$\alpha(T) = b\cosh(a\sqrt{T})$	1.0013 x 10^{-8}	1.1938 x 10^{-7}	17.010343	0.9990341115

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se também que a função F2 apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2), embora todos os ajustes tenham apresentado valores muito próximos. A Figura 4.38 apresenta os gráficos da cinética de aquecimento no centro do recipiente.

Figura 4.38: Representação gráfica da penetração de calor a partir de simulação numérica via funções (a) F2 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente.



Fonte: Autoria própria.

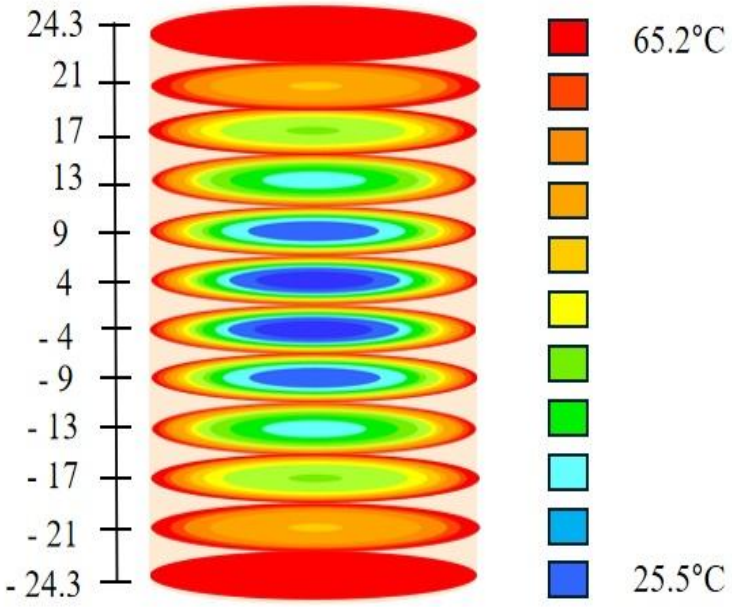
Os resultados foram simulados numericamente por meio da função F2 (Figura 4.38(a)) e da função F1 constante (Figura 4.38(b)). Nas figuras, observa-se que as curvas vermelhas representam os dados de aquecimento obtidos pelas simulações, enquanto as linhas pretas pontilhadas correspondem à evolução da temperatura registrada nos experimentos.

Conclui-se que, para essa experiência, as funções F2 e F1 ajustam-se adequadamente aos dados experimentais, pois as curvas simuladas representam de forma satisfatória o comportamento observado nos resultados experimentais. Os resultados mostraram-se bastante próximos entre si, evidenciando a consistência e a confiabilidade dos dados obtidos.

4.6.11 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor.

A Figura 4.39 apresenta os contornos das curvas isotérmicas nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), no instante de 7 minutos e 8 segundos.

Figura 4.39: Contornos das isotérmicas da Função F2 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 08 segundos.

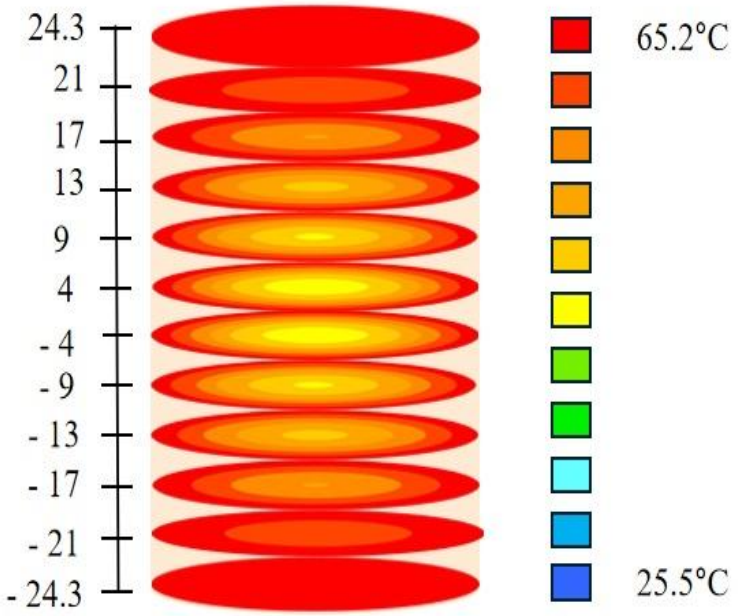


Fonte: Autoria própria.

Observa-se claramente, por meio da simulação, a diferença entre os contornos das isotérmicas nos diferentes planos. Esse comportamento já era fisicamente esperado, uma vez que os perfis das curvas isotérmicas dependem da posição do plano em relação ao centro da amostra, isto é, de sua maior ou menor proximidade com a superfície. Por exemplo, nos planos y = 4 mm e 9 mm, no instante de 7 minutos e 2 segundos após o início do processo, verifica-se que ainda há uma quantidade significativa de pontos da polpa da graviola que permanecem na temperatura inicial do processo, ou muito próxima a ela.

Na Figura 4.40, está representada a simulação da penetração de calor na polpa de graviola, mostrando a distribuição de temperatura no instante de 22 minutos e 3 segundos.

Figura 4.40: Contornos das isotérmicas da Função F2 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 03 segundos.



Fonte: Autoria própria.

A figura permite observar como o calor se espalhou pela polpa, evidenciando as regiões que atingiram temperaturas mais altas e aquelas que ainda estavam em aquecimento. Além disso, a análise da figura ajuda a identificar a distribuição da temperatura no interior do material.

4.6.12 Otimização para amostra GR6.

Para estimar a difusividade térmica aparente, utilizou-se a amostra GR6 aplicada aos dados das Tabelas B.12 (em anexo), obtendo-se os resultados otimizados apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência no centro da amostra referente a GR6, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2).

F	a	b	χ^2	R^2
$\alpha(T) = b$	0.00	1.2146 x 10^{-7}	2.164435	0.9998741671
$\boldsymbol{\alpha(T) = be^{(a.T)}}$	4.1849 x 10^{-7}	1.0438 x 10^{-7}	7.854212	0.9996394574
$\alpha(T) = be^{(a.T^2)}$	7.9332 x 10^{-15}	1.0658 x 10^{-7}	6.527799	0.9996996470
$\alpha(T) = b\cosh(a.T)$	9.9999 x 10^{-7}	1.2132 x 10^{-7}	2.164264	0.9998747702
$\boldsymbol{\alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}}$	**1.0004 x 10^{-7}**	**1.2132 x10^{-7}**	**2.164264**	**0.9998747702**
$\alpha(T) = b\cosh(a\sqrt{T})$	1.2132 x 10^{-7}	1.2146 x 10^{-7}	2.164435	0.9998741671

Fonte: Autoria própria.

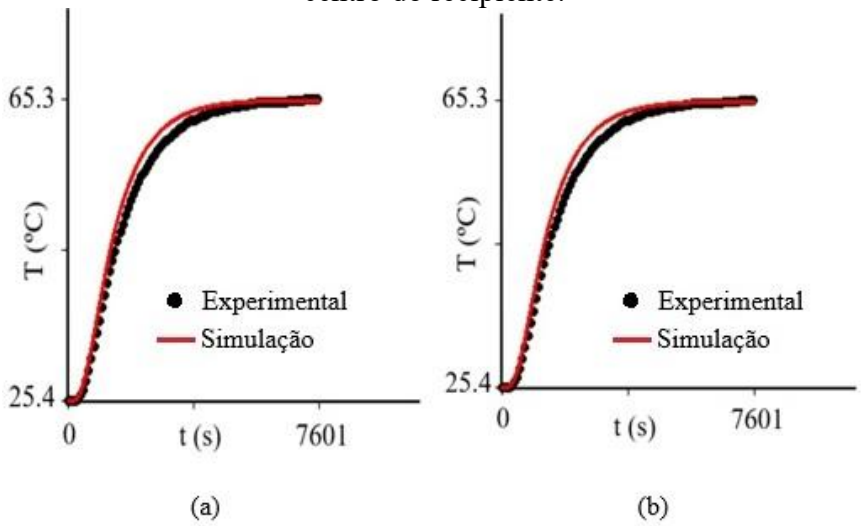
A otimização foi realizada para diferentes funções, os reultados podem ser vistos na Tabela 4.8. Foram avaliados os parâmetros de ajuste com base no χ^2 e no coeficiente de determinação (R^2), considerando-se o melhor ajuste aquele com menor χ^2. A análise permitiu identificar a função que melhor representou o comportamento térmico observado. Esse procedimento garantiu maior precisão na modelagem da difusividade térmica aparente durante o processo de pasteurização.

A partir da análise da Tabela 4.7, constata-se que, na experiência GR5, as funções F4 e F5 apresentaram os menores valores de χ^2 para a difusividade térmica aparente da polpa de graviola, bem como os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2), em comparação às demais funções avaliadas. Diante desses resultados, a função F5 deveria ser considerada a mais adequada para representar esse experimento.

A Figura 4.41 apresenta os gráficos da cinética de aquecimento no centro do recipiente, obtidos por simulações numéricas com a função F5 e a função F1 constante.

As curvas em vermelho representam os resultados das simulações, enquanto as linhas pretas pontilhadas indicam a variação da temperatura obtida experimentalmente.

Figura 4.41: Representação gráfica da penetração de calor a partir da simulação numérica via funções (a) F5 e (b) F1 e a dos pontos experimentais da temperatura no centro do recipiente.



Fonte: Autoria própria.

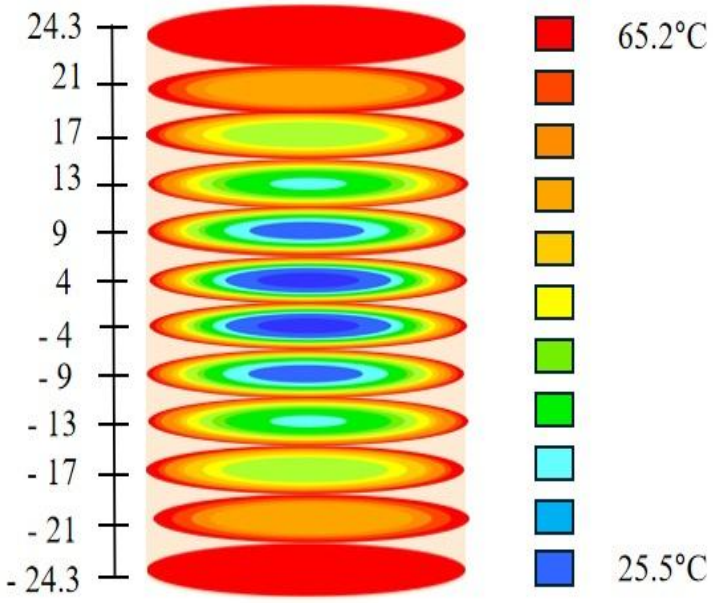
Os gráficos da Figura 4.41 (a) e (b) mostram que, no início do aquecimento, a temperatura no centro do recipiente aumenta lentamente. Embora diferenças entre os resultados simulados e experimentais apareçam em instantes intermediários, ao final do processo ambas as curvas convergem para a temperatura de equilíbrio, evidenciando que as simulações representam o comportamento térmico do Sistema apena ao final do processo.

As funções utilizadas não descrevem tão bem a tendência do processo para o caso da amostra GR6.

4.6.13 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor

A Figura 4.42 apresenta as curvas isotérmicas simuladas no cilindro, obtidas em diferentes planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), em um mesmo instante de tempo (t = 7 minutos e 13 segundos), do início do processo de pasteurização da polpa de graviola.

Figura 4.42: Contornos das isotérmicas da Função F5 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 7 minutos e 13 segundos.



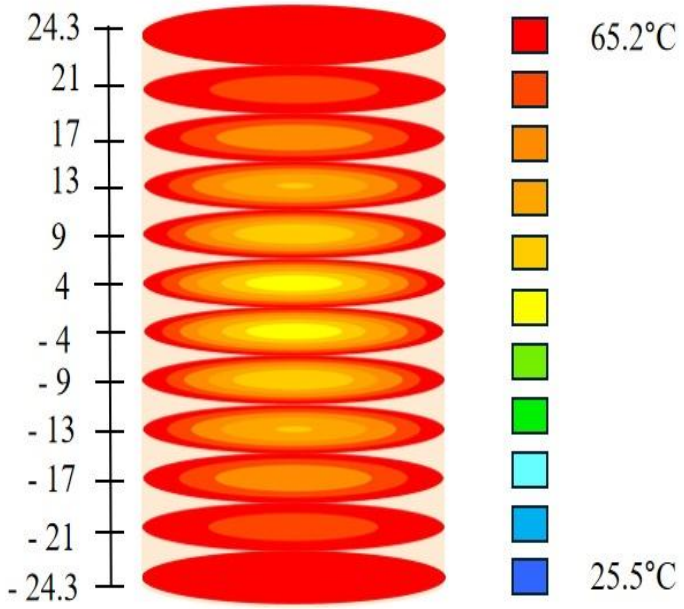
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, nesse instante, o calor se propaga da superfície para o interior do cilindro, aquecendo primeiramente as regiões próximas à extremidade. O centro da amostra permanece em temperatura mais baixa, indicando que o aquecimento ainda não se distribuiu de forma uniforme por todo o volume.

A Figura 4.43 apresenta a simulação da distribuição de temperatura no interior de um cilindro contendo polpa de graviola, no tempo de 22 minutos e 02 segundos após o início do processo. Essa representação permite visualizar como a temperatura se encontra distribuída nas diferentes regiões do sistema nesse instante. As áreas destacadas em vermelho indicam regiões com temperaturas mais elevadas, evidenciando que o calor tende a se concentrar inicialmente nas partes externas do cilindro.

Observa-se ainda que o aquecimento se inicia na superfície do material e, com o passar do tempo, o calor se propaga gradualmente em direção ao interior da amostra. Esse comportamento evidencia o processo de transferência de calor das regiões externas para as regiões internas, caracterizando o fenômeno de difusão térmica no interior do sistema.

Figura 4.43: Contornos das isotérmicas da Função F5 $= \alpha(T)$ constante nos planos (y = 4 mm, 9 mm, 13 mm, 17 mm e 21 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 22 minutos e 02 segundos.



Fonte: Autoria própria.

As regiões centrais exibem cores mais claras, correspondentes a temperaturas inferiores, o que indica que o calor ainda não se distribuiu de maneira completamente uniforme em todo o cilindro; contudo, o processo já se aproxima do equilíbrio térmico.

4.7 Média das pasteurizações (GRM).

A função que melhor representa a difusividade térmica aparente, com base nos valores médios, foi determinada a partir dos dados apresentados na Tabela B.14 (Apêndice B), cujos resultados otimizados encontram-se dispostos na Tabela 4.9. O processo de otimização foi realizado para diferentes funções. Os parâmetros de ajuste foram avaliados com base no valor de χ^2 e no coeficiente de determinação (R^2), sendo considerado como melhor ajuste aquele que apresentou o menor valor de χ^2.

Essa análise possibilitou a identificação da função que melhor representou o comportamento térmico observado. A aplicação do procedimento adotado assegurou maior precisão na modelagem da difusividade térmica aparente durante o processo de pasteurização.

Tabela 4.9: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente com valores médios das pasteurizações, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2).

F	a	b	χ^2	R^2
$\alpha(T) = b$	0.00	1.2146×10^{-7}	2.1649	0.99987398
$\alpha(T) = be^{(a.T)}$	9.756485×10^{-7}	1.1605×10^{-7}	2.0775	0.99987949
$\alpha(T) = be^{(a.T^2)}$	$6.7875019 \times 10^{-15}$	1.2133×10^{-7}	2.1644	0.99987479
$\boldsymbol{\alpha(T) = bcosh\,(a.T)}$	$\mathbf{3.2289634 \times 10^{-3}}$	$\mathbf{1.2020 \times 10^{-7}}$	**1.8995**	**0.99988953**
$\boldsymbol{\alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}}$	$\mathbf{1.0020012 \times 10^{-7}}$	$\mathbf{1.2182 \times 10^{-7}}$	**1.8221**	**0.99989372**
$\boldsymbol{\alpha(T) = bcosh(a\sqrt{T})}$	$\mathbf{1.0004990 \times 10^{-7}}$	$\mathbf{1.2187 \times 10^{-7}}$	**1.8220**	**0.99989372**

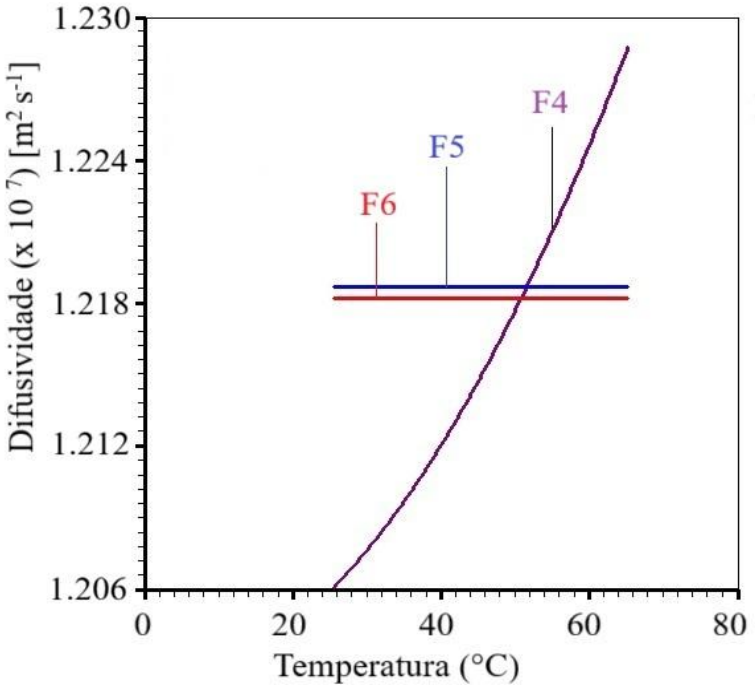
Fonte: Autoria própria.

A análise dos resultados da Tabela 4.9, indica que o valor de χ^2 associado à difusividade térmica aparente, quando representada pela função F1 = α(T) = b, é o mais elevado entre as seis funções avaliadas. Verifica-se, ainda, que a função F6 apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2) em comparação às demais; entretanto, os valores de R^2 mostraram-se bastante próximos, não evidenciando diferenças significativas entre as funções analisadas.

Dentre as seis funções avaliadas para o valor médio (Tabela 4.9), observou-se que três apresentaram melhor desempenho. Para otimizar a modelagem do comportamento térmico do sistema, as expressões obtidas foram inseridas no *software* LabFit, sendo selecionadas as funções $F4 = \alpha(T) = bcosh(aT)$, $F5 = \alpha(T) = be^{(a\sqrt{T})}$ e $F6 = \alpha(T) = bcosh(a\sqrt{T})$, por apresentarem os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2). Essas funções foram consideradas as mais promissoras para a representação da difusividade térmica aparente e submetidas a uma análise mais detalhada, com o objetivo de assegurar maior confiabilidade aos resultados das simulações computacionais.

As três funções que melhor descrevem a difusividade térmica aparente da polpa de graviola em função da temperatura local são apresentadas na Figura 4.44. Observa-se que essas funções mantiveram a mesma ordem de significância em todas as pasteurizações realizadas, evidenciando a proximidade entre as curvas ajustadas. Esse resultado indica elevada precisão nos ajustes obtidos.

Figura 4.44: Gráfico mostrando as três melhores funções para a difusividade térmica da polpa de graviola (amostra GRM).



Fonte: Autoria própria.

A função F6 destacou-se por apresentar o maior coeficiente de determinação (R^2) e o menor valor de qui-quadrado (χ^2) conforme visto na Tabela 4.8. Entretanto, seu comportamento ao longo da faixa de temperatura analisada aproxima-se ao de uma função constante. A função F5 apresenta comportamento semelhante, com variação pouco significativa em relação à temperatura.

Em contrapartida, a função F4, embora apresente indicadores estatísticos ligeiramente inferiores, evidencia uma variação mais coerente da difusividade térmica com a temperatura, em conformidade com o comportamento físico esperado, como pode ser observado na Figura 4.46. Esse padrão demonstra que a função F4 é mais sensível às mudanças de temperatura e, portanto, fornece uma representação mais precisa da difusividade térmica aparente ao longo da faixa térmica analisada.

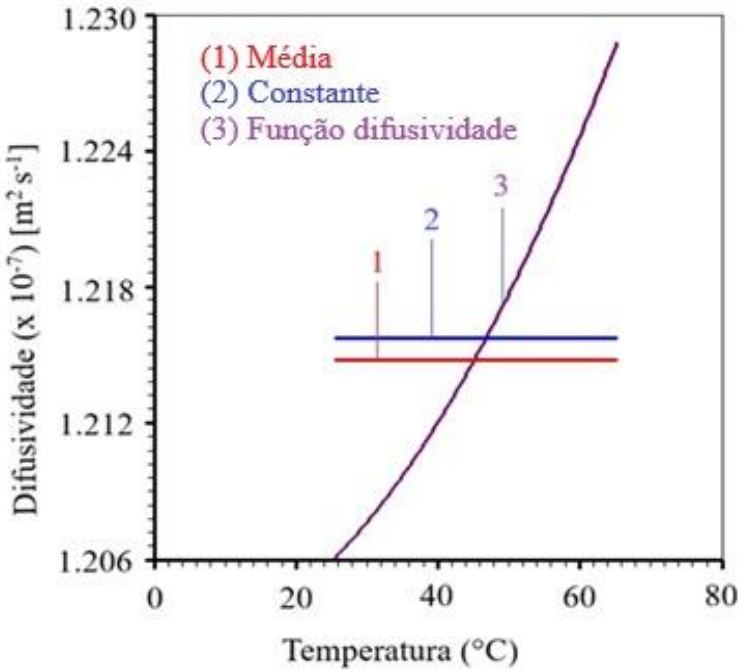
Diante do exposto a função F4 foi a escolhida para a análise das pasteurizações do presente trabalho.

Os dados experimentais obtidos em todas as condições analisadas representam um processo de aquecimento em regime transiente, visto que a temperatura da polpa de graviola apresentou variação contínua ao longo do tempo. Isso indica que a transferência de calor no interior do produto ocorreu de forma não estacionária,

tornando necessário relacionar a difusividade térmica aparente com a temperatura medida durante o aquecimento. Dessa maneira, a difusividade térmica passa a ser considerada dependente das variações térmicas observadas no interior da amostra ao longo do processo.

Para a pasteurização média GRM (Graviola Média), os valores obtidos para a difusividade térmica, considerando a condição de contorno constante e utilizando as expressões F4 e F1, foram, respectivamente, $\alpha = 1.2020 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $\alpha = 1.2147 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Esses resultados indicam boa proximidade entre os valores calculados pelos dois modelos analisados, demonstrando consistência na estimativa da difusividade térmica da polpa de graviola. Os gráficos correspondentes são apresentados na Figura 4.45.

Figura 4.45: Função difusividade média da polpa de graviola.Figura 4.45: Função difusividade média da polpa de graviola.

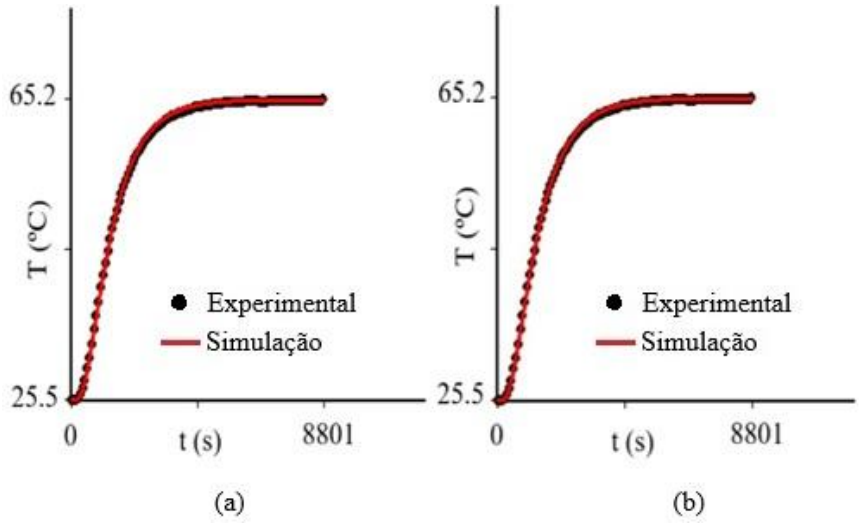


Fonte: Autoria própria.

Para os dados médios, observa-se que os valores obtidos por simulação por meio da função F4 (Figura 4.45) apresentam bom ajuste aos dados experimentais, mantendo as curvas coerentes ao longo do processo analisado. No caso da difusividade térmica representada pela função F1 (Figura 4.45), os valores simulados também demonstram um ajuste preciso.

Os resultados apresentados na Figura 4.48 correspondem ao gráfico da cinética de evolução da temperatura no centro do recipiente, obtida por simulação numérica utilizando a função dependente da temperatura local F4 $= \alpha(T) = b\cosh(aT)$, (Figura 4.46a) e a função constante, F1 = α(T) = b, (Figura 4.46b). Em ambas as situações, a cinética de aquecimento dos dados experimentais médios é representada pelos pontos de cor preta.

Figura 4.46: Cinética de aquecimento no centro obtido pela simulação das funções (a) F4 e (b) F1. A cinética de aquecimento dos dados médios é mostrado nos dois gráficos (pontos pretos).



Fonte: Autoria própria.

A Figura demonstra que os dados experimentais e simulados apresentam comportamento bastante semelhante para as funções F4 (a) e F1 (b). Observa-se que as curvas permaneceram praticamente sobrepostas ao longo de todo o processo, indicando forte concordância entre os resultados e adequada representação da evolução térmica durante o aquecimento.

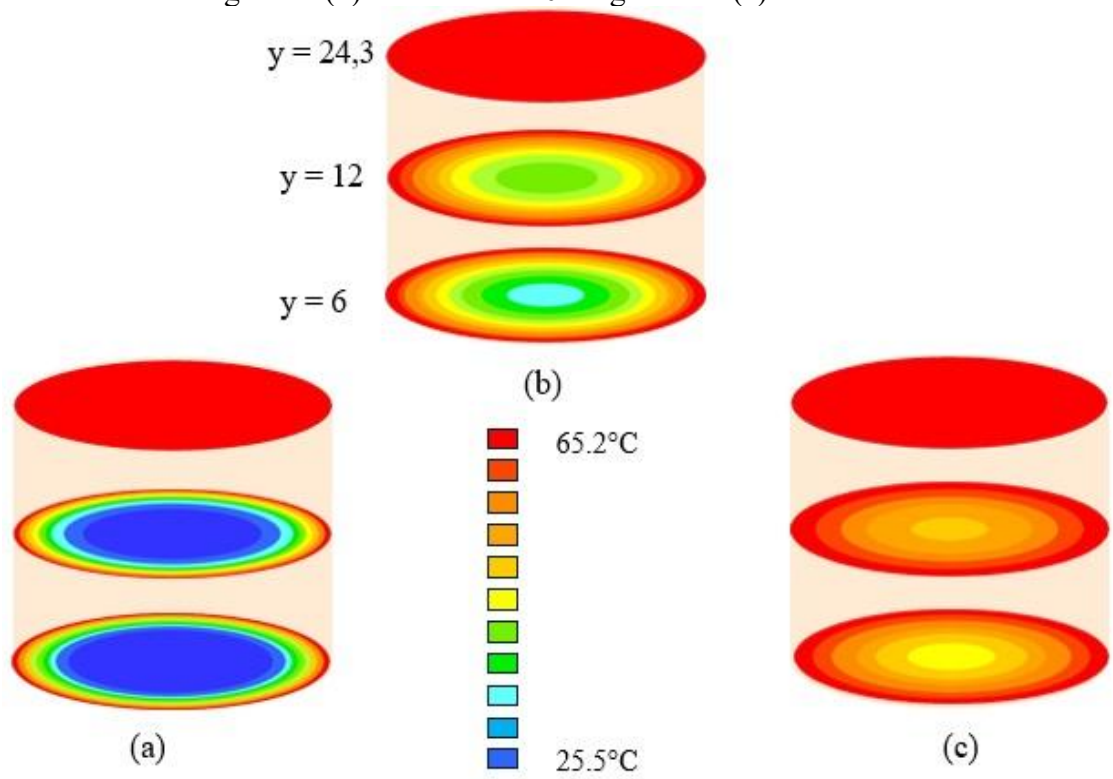
4.7.1 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor contorno constante.

Uma forma de analisar a distribuição de calor no interior do produto ao longo do tempo é por meio da avaliação das superfícies circulares presentes no cilindro, considerando áreas que se estendem das regiões próximas à parede do recipiente até zonas localizadas nas proximidades da parte central da amostra. Essa análise foi

realizada adotando-se difusividade térmica constante, permitindo observar o comportamento da propagação de calor durante o processo de aquecimento. A faixa de temperatura considerada variou entre 25,5 °C e 65,2 °C.

Na Figura 4.47 são apresentadas as distribuições térmicas em três seções do cilindro: no topo (y = 24,3 mm) e em duas seções localizadas a 6 mm e 12 mm de altura em relação ao centro do recipiente, sob condição de contorno constante. Os resultados das simulações numéricas são apresentados na forma de mapas de calor, nos quais as diferentes cores representam os gradientes de temperatura no interior da amostra, conforme indicado na legenda apresentada acima das figuras.

Figura 4.47: Cinética de aquecimento obtido pela simulação da função media constante nos planos (y = 6 mm e 12 mm), nos instantes de tempos de (a) 3minuto e 05 segundos (b) 12 minutos e 02 segundos e (c) 22 minutos.



Fonte: Autoria própria.

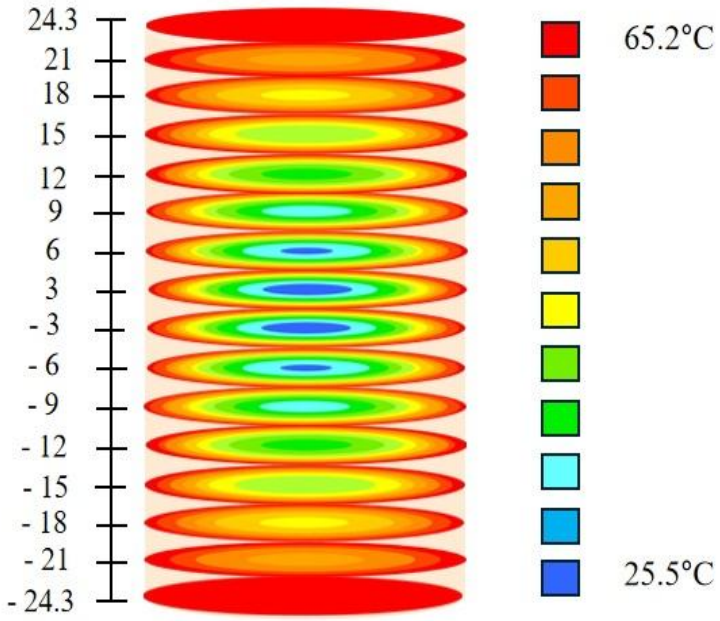
É possível observar, por meio dessas curvas, que a propagação do calor ocorre da superfície interna do recipiente em direção ao centro da amostra. Verifica-se ainda que o gradiente de temperatura, em qualquer ponto analisado, apresenta uma distribuição com geometria semelhante à do corpo cilíndrico, sem variações significativas na direção de propagação do calor ao longo do aquecimento.

Observa-se também que, mesmo após três minutos de processo, a temperatura na região central permanece próxima à temperatura inicial, indicando que o centro da amostra apresenta aquecimento mais lento em relação às demais regiões. Esse comportamento torna o ponto central uma região de grande interesse para a análise da transferência de calor e da eficiência do processo de pasteurização.

4.7.2 Simulação da distribuição de calor com condição de contorno constante

A simulação apresentada na Figura 4.48 ilustra a distribuição de temperatura em um cilindro, no qual o calor se propaga das extremidades em direção ao centro. As regiões em vermelho correspondem às áreas de maior temperatura, localizadas nas extremidades, enquanto as regiões em azul indicam as partes mais frias.

Figura 4.48: Contornos das isotérmicas da Função F4 = α(T) constante nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 10 minutos e 07 segundos.



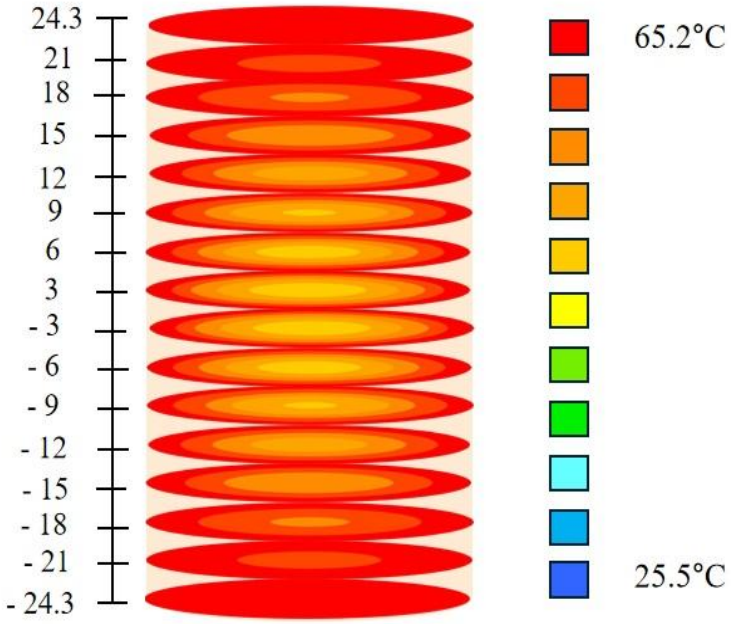
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o calor se propaga gradualmente em direção à região central da amostra, promovendo o aumento da temperatura ao longo do tempo e caracterizando um processo de condução térmica com tendência ao equilíbrio térmico. Verifica-se ainda que, no instante de 10 minutos e 7 segundos, a região central do cilindro apresenta áreas com pequena variação de temperatura em relação à condição inicial. Esse comportamento indica que o calor transferido pelas extremidades ainda não foi distribuído de maneira uniforme em todo o domínio da amostra, evidenciando que o aquecimento da região central ocorre de forma mais lenta e gradual.

Esse resultado é compatível com os dados experimentais obtidos, uma vez que as medições de temperatura mostraram que o centro da amostra corresponde ao ponto termicamente menos favorecido durante o processo de aquecimento, necessitando de um maior intervalo de tempo para atingir o equilíbrio térmico em relação às regiões próximas à superfície do recipiente.

A Figura 4.49 apresenta a simulação no instante de 25 minutos e 05 segundos, no qual foi verificada a distribuição de calor em sete planos distintos ao longo do cilindro.

Figura 4.49: Contornos das isotérmicas F4 = α(T) constante nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 25 minutos e 05 segundos.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, nesse instante, a distribuição de temperatura se encontra mais homogênea ao longo do domínio, e as regiões centrais da amostra já atingiram ou estão muito próximas da temperatura de equilíbrio, indicando que o calor proveniente das extremidades se propagou de forma mais eficiente até o interior do material.

Em todas as análises realizadas, verifica-se que a região central da amostra apresenta o maior tempo para atingir o equilíbrio térmico, em razão da menor taxa de transferência de calor nessa região, quando comparada às zonas próximas ao contorno. Esse comportamento é compatível com os dados experimentais obtidos, nos quais o ponto central também se destaca como a região termicamente mais lenta durante o processo de aquecimento.

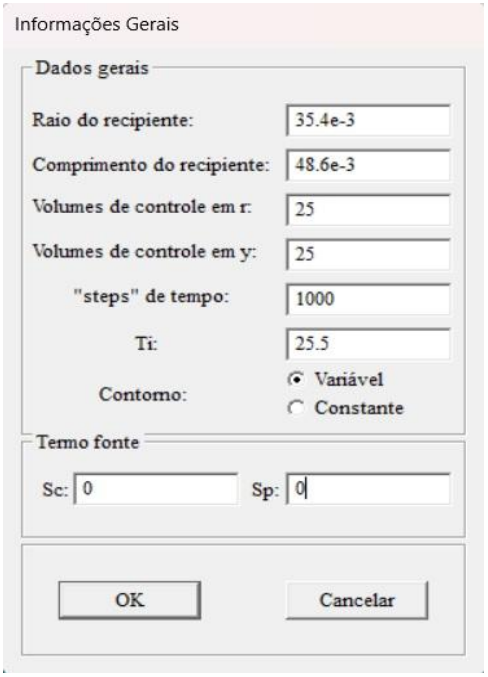
Dessa forma, considera-se que o processo de pasteurização somente pode ser concluído quando todos os pontos do domínio analisado atingem a condição de equilíbrio térmico previamente estabelecida, garantindo a uniformidade do tratamento térmico em toda a amostra.

4.8 Difusividade térmica variável com condição de contorno do primeiro tipo variável.

Após a definição da função que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, torna-se necessária a realização de uma nova etapa de simulação no *software* Numerical Heat Transfer, com o objetivo de representar de forma mais precisa a variação temporal do contorno térmico do sistema. Essa etapa é fundamental para validar o modelo escolhido, uma vez que utiliza os parâmetros otimizados na etapa anterior, permitindo uma análise mais fiel do comportamento térmico ao longo do tempo.

Em seguida, são inseridos novamente os dados gerais do problema na caixa de diálogo correspondente, conforme ilustrado na Figura 4.50. Nessa interface, o usuário informa os parâmetros geométricos, as condições iniciais e as condições de contorno adotadas, garantindo que a simulação seja executada com base na configuração adequada do sistema físico estudado. Dessa forma, assegura-se a consistência entre o modelo matemático e as condições reais do experimento, permitindo uma representação mais confiável da evolução térmica do processo.

Figura 4.50: Caixa de diálogo preenchimento das informações gerais.



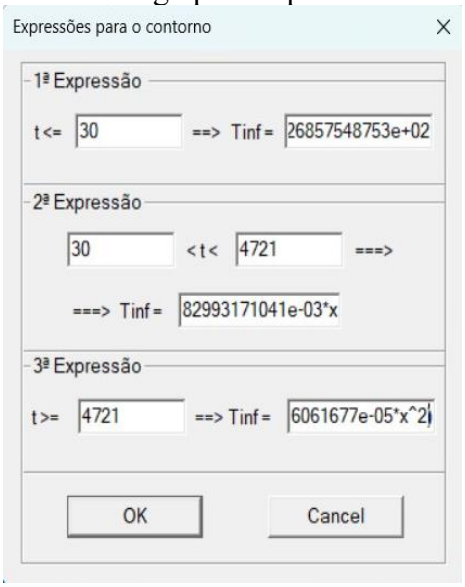
Fonte: Autoria própria.

Ao selecionar a opção “Contorno Variável”, é exibida uma nova janela de configuração, conforme ilustrado na Figura 4.51. Essa etapa permite ao usuário definir de forma mais detalhada o comportamento térmico nas fronteiras do domínio, considerando sua variação ao longo do tempo.

Nessa interface, devem ser inseridas as expressões matemáticas que representam o contorno térmico do sistema, as quais são organizadas em três intervalos temporais distintos. Essa divisão temporal tem como objetivo representar de maneira mais fiel as diferentes etapas do processo térmico, permitindo que o modelo acompanhe as mudanças nas condições de contorno durante a evolução do sistema. Dessa forma, é possível obter uma simulação mais realista e coerente com o comportamento físico observado experimentalmente.

- A primeira expressão corresponde a intervalos de tempo menores ou iguais a 30 segundo;
- A segunda, a intervalos estritamente menores que 30 segundo ou estritamente maiores que 4721 segundos;
- A terceira, a intervalos maiores ou iguais a 4721 segundos.

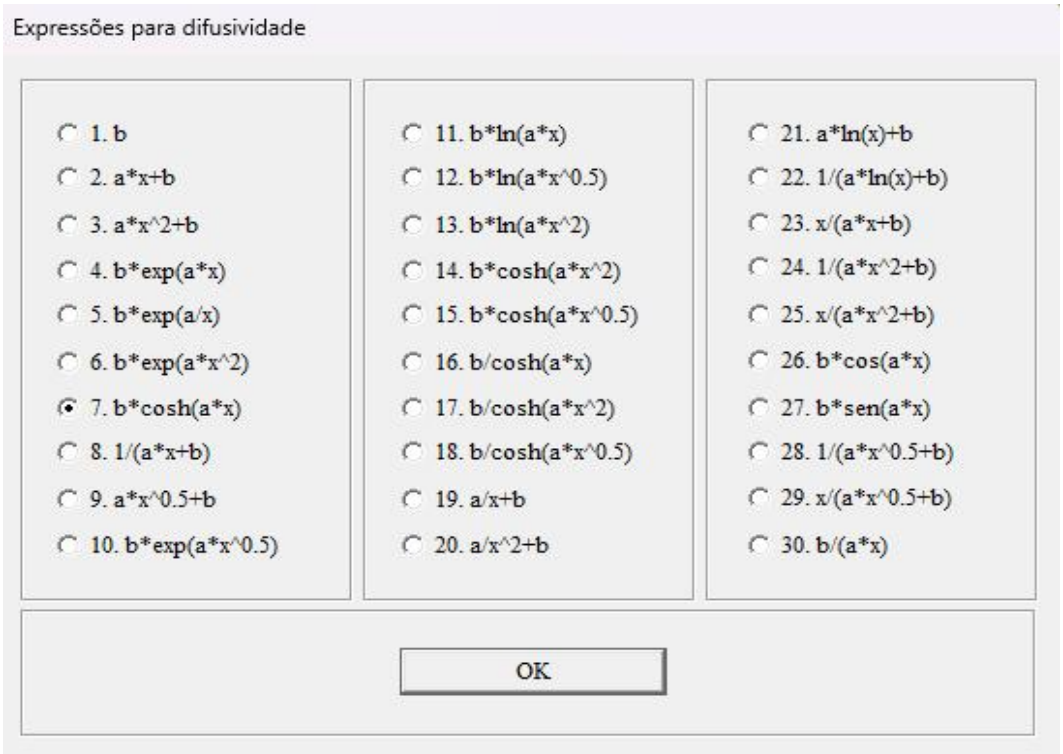
Figura 4.51: Caixa de diálogo para expressões de contorno variável.



Fonte: Autoria própria.

Após o preenchimento das expressões necessárias para o contorno variável a ser otimizado, será aberta uma caixa de diálogo, na qual a expressão para a difusividade correspondente foi selecionada, conforme ilustrado na Figura 4.52.

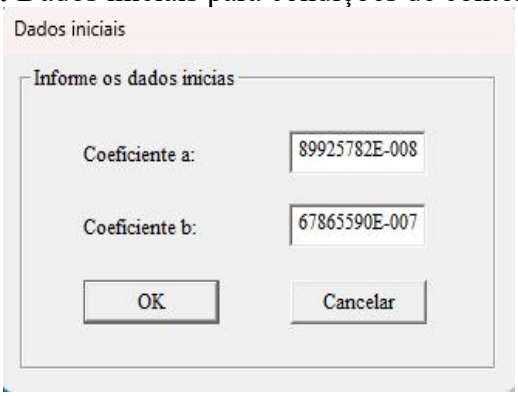
Figura 4.52: Caixa de diálogo para que seja escolhida uma expressão para a difusividade



Fonte: Autoria própria.

A caixa de diálogo do *software* desenvolvido apresenta trinta expressões matemáticas disponíveis para representar a difusividade térmica, sendo selecionada uma delas para a realização da simulação, conforme ilustrado na Figura 4.53. Em seguida, uma nova caixa de diálogo é exibida para a inserção dos dados iniciais necessários ao processamento da simulação, também apresentada na Figura 4.53.

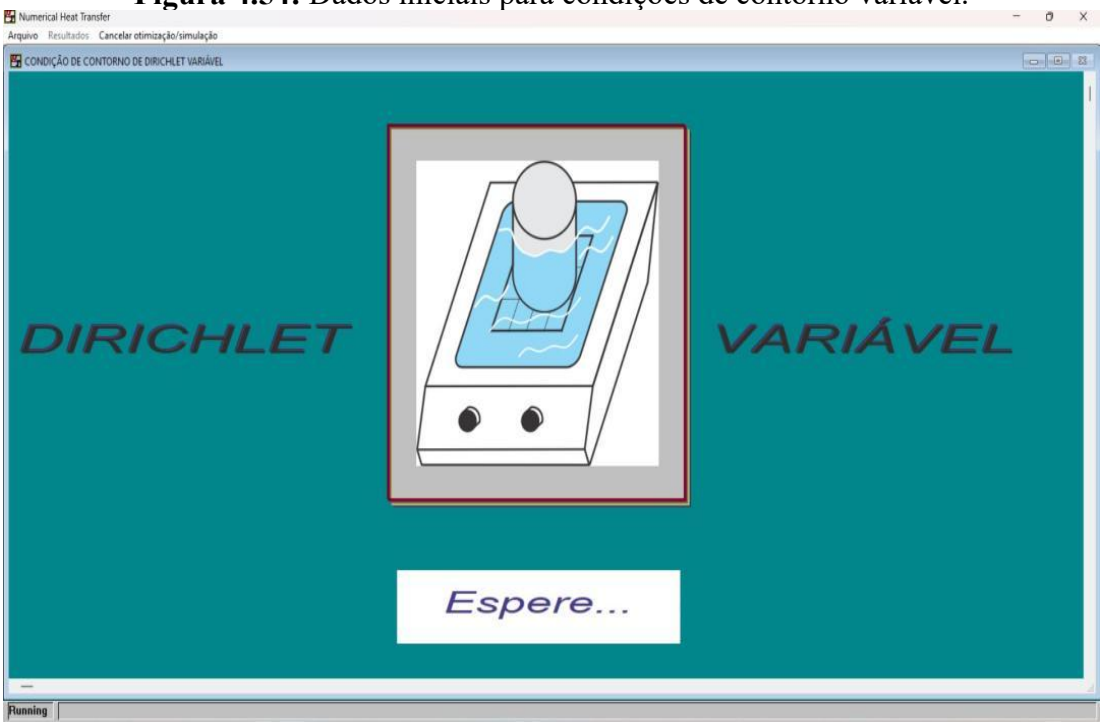
Figura 4.53: Dados iniciais para condições de contorno variável.



Fonte: Autoria própria.

Após inserir os dados dos coeficientes e clicar em "OK", inicia-se o processo de otimização, durante o qual uma mensagem de "Espere" é exibida na tela (Figura 4.54) enquanto o otimizador atualiza continuamente a minimização do qui-quadrado.

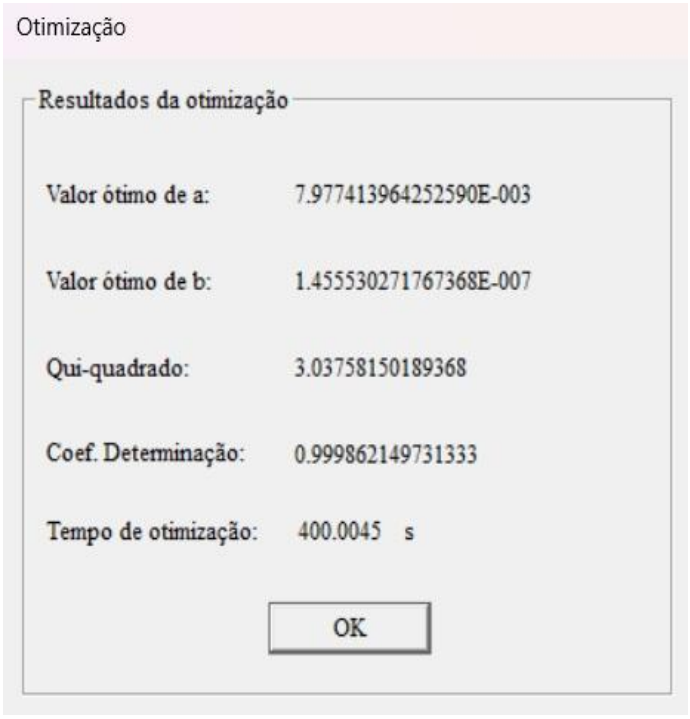
Figura 4.54: Dados iniciais para condições de contorno variável.



Fonte: Autoria própria.

O usuário tem a opção de interromper o processo a qualquer momento, clicando no menu “Cancelar otimização/simulação”. Nesse caso, os resultados parciais do processo de otimização serão exibidos em uma caixa de diálogo em arquivo txt, conforme a Figura 4.55.

Figura 4.55: Resultados parciais da otimização.



Fonte: Autoria própria.

Caso o usuário opte por finalizar o processo, ao término da execução será gerado automaticamente um arquivo no formato “.txt”, contendo os principais resultados da simulação e da etapa de otimização. Nesse arquivo são apresentados os valores dos coeficientes estimados pelo modelo, bem como os indicadores estatísticos utilizados para avaliar a qualidade do ajuste, como o qui-quadrado (χ^2) e o coeficiente de determinação (R^2).

Além disso, o arquivo também organiza os dados obtidos em cada fase do processo, permitindo o acompanhamento detalhado da evolução dos resultados ao longo da simulação, conforme ilustrado na Figura 4.56. Essas informações possibilitam uma análise mais completa do desempenho do modelo adotado, facilitando a interpretação e validação dos resultados obtidos. Dessa forma, o arquivo gerado reúne,

de maneira estruturada, os principais dados necessários para a avaliação do processo como um todo.

Figura 4.56: Arquivo “ótimo.txt” expressão para difusividade e dados da otimização.

```
EXPRESSÃO PARA A DIFUSIVIDADE:          7

RAIO:
35.4E-3


COMPRIMENTO:
48.6E-3



                        PARÂMETROS ÓTIMOS

VALOR DO PARÂMETRO A:  7.977413964252590E-003
VALOR DO PARÂMETRO B:  1.455530271767368E-007
QUI-QUADRADO:   3.03758150189368
R^2:  0.999862154628937

                        DADOS FORNECIDOS

NÚMERO MÁXIMO DE ITERAÇÕES DO MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL:   1000.00000000000

MALHA:25X25

1ª Fase: t<=30=>
T(t) = 0.52821087526e+00*x+0.26857548753e+02

2ª Fase:30 < t <4721 =>
T(t) = 0.20154000723e+02*(log(x+0.20931767517e+01))^0.57653685455e+00-0.82993171041e-03*x

3ª Fase: t > = 4721=>
T(t) = (-0.16038437093e+06+x)/(-0.24182057036e+04+0.10456061677e-05*x^2)

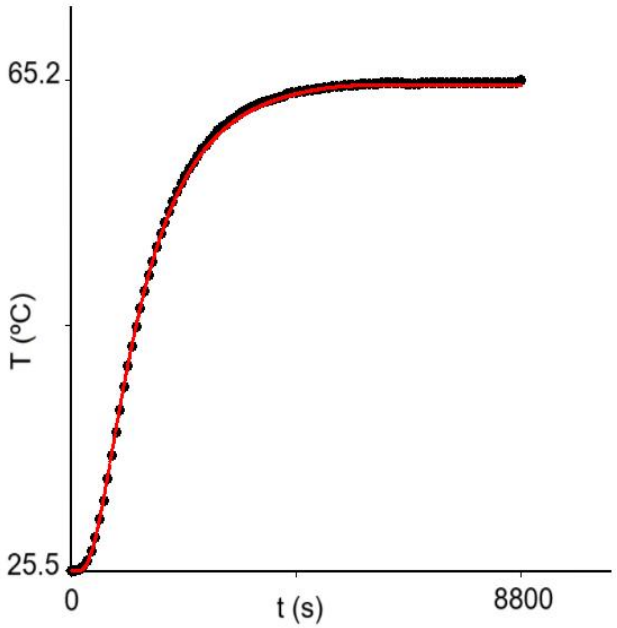
"STEPS" DE TEMPO:        1000

TEMPO DE OTIMIZAÇÃO:   46828.88     s
```

Fonte: Autoria própria.

Ao final da simulação, também é gerado automaticamente um gráfico do processo em formato de imagem BMP, conforme ilustrado na Figura 4.57. Esse arquivo apresenta de forma visual os resultados obtidos ao longo do tempo, permitindo observar o comportamento do sistema durante toda a evolução da simulação..

Figura 4.57: Simulação do processo.



Fonte: Autoria própria.

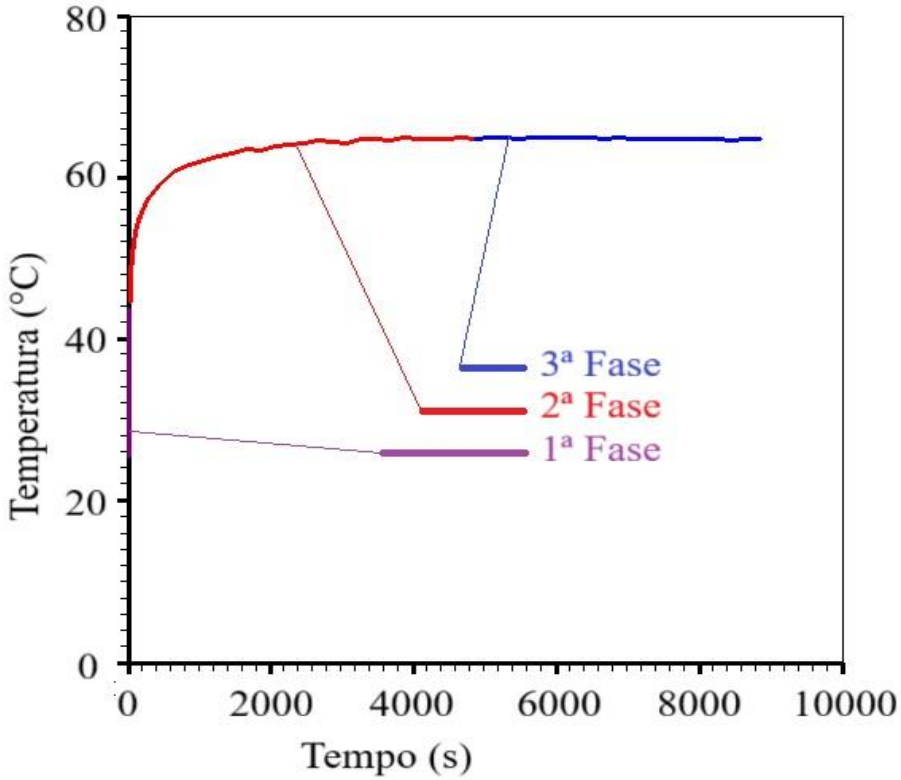
4.8.1 Determinação das expressões para a temperatura de contorno variável de primeiro tipo.

Para o estudo da penetração de calor no interior do recipiente contendo a polpa de graviola e para a otimização da modelagem do comportamento térmico do sistema, considerando a temperatura de contorno variável de primeiro tipo, a função F4 foi adotada no processo de otimização. Essa escolha deve-se à sua maior capacidade de representar a cinética de penetração de calor no centro do recipiente, bem como de descrever de forma satisfatória a evolução temporal da temperatura na superfície da amostra.

4.8.2 Expressão para difusividade térmica considerando contorno do primeiro tipo variável.

A análise visual apresentada evidencia a variação da temperatura no contorno ao longo do tempo, destacando a divisão do processo térmico em três fases distintas. A cinética térmica apresentada na Figura 4.58.

Figura 4.58: Identificação das fases.



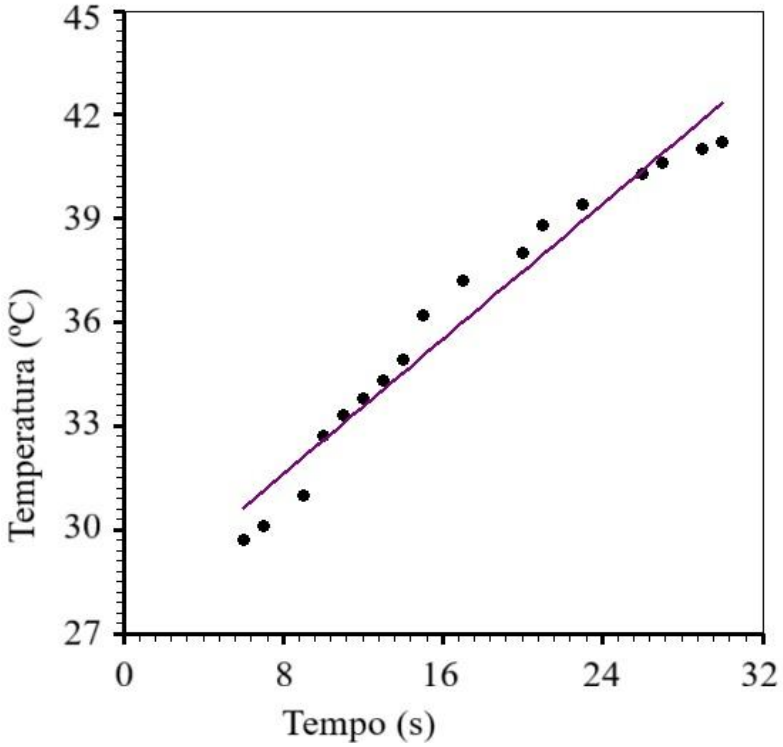
Fonte: Autoria própria.

Essa curva foi obtida a partir dos pontos experimentais coletados durante o processo de pasteurização. Para a realização do ajuste dos dados experimentais, foi utilizado o *software* LabFit (Silva e Silva, 2009), permitindo representar de forma consistente o comportamento térmico do sistema ao longo do aquecimento. Os resultados obtidos confirmam a coerência da análise realizada e evidenciam a precisão tanto do método experimental quanto da metodologia empregada no tratamento e ajuste dos dados.

Na 1ª fase, representada pela curva em lilás, observa-se um aumento inicial mais gradual da temperatura, indicando o início do processo de aquecimento. Em seguida, na 2ª fase, indicada pela curva em vermelho, ocorre um crescimento mais acentuado da temperatura, caracterizando um regime de maior taxa de transferência de calor. Por fim, na 3ª fase, representada pela curva em azul, a temperatura tende à estabilização, mantendo-se praticamente constante ao longo do tempo, o que indica a aproximação do sistema ao equilíbrio térmico. Essa divisão foi realizada visando proporcionar um melhor ajuste das funções obtidas, sendo adotada uma função específica para representar cada fase do processo.

A Figura 4.59 apresenta o ajuste obtido pelo *software* a partir dos dados experimentais.

Figura 4.59: Ajuste primeira fase (contorno).



Fonte: Autoria própria.

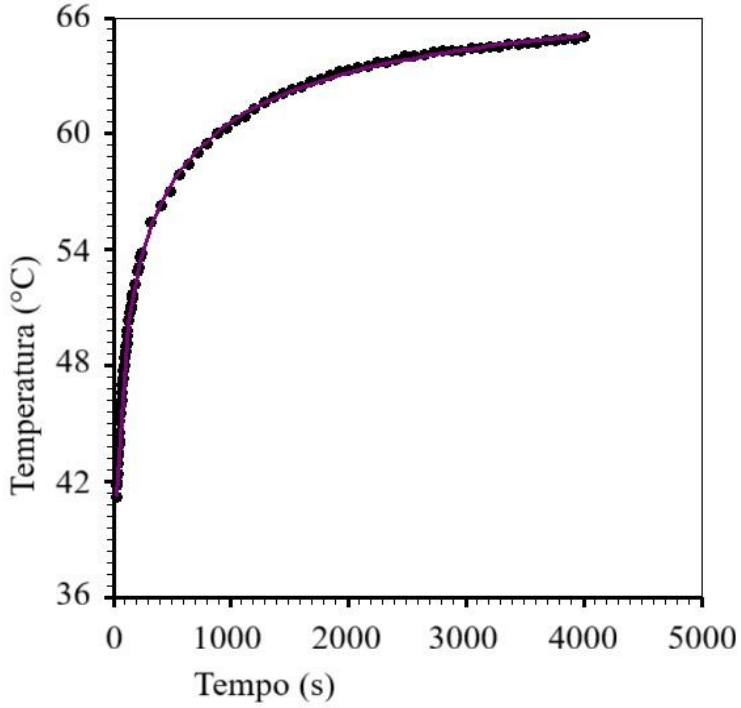
Para a obtenção da função que apresentou o melhor ajuste em cada fase, foi utilizado o *software* LabFit (Silva e Silva, 2009). Esse *software* possui uma biblioteca composta por mais de 200 funções matemáticas passíveis de ajuste aos dados experimentais. Além disso, dispõe de uma ferramenta específica cujo objetivo é identificar automaticamente a expressão matemática que melhor se ajusta aos dados experimentais analisados.

Esse procedimento consistiu na adição e remoção controlada de pontos experimentais, com o objetivo de verificar possíveis melhorias nos indicadores estatísticos de qualidade do ajuste, especialmente o coeficiente de determinação (R^2) e o valor do qui-quadrado, utilizados para avaliar a adequação do modelo matemático aos dados experimentais. A cada modificação efetuada, foi realizada a avaliação comparativa dos resultados obtidos, considerando-se tanto a evolução dos parâmetros estatísticos quanto a coerência do ajuste linear. Quando foi constatada piora nos indicadores estatísticos, optou-se pelo retorno à configuração anterior, por esta ter sido

considerada a que proporcionou o melhor ajuste linear e maior consistência estatística, sendo, assim, adotada para a continuidade da análise.

A Figura 4.60 apresenta o ajuste obtido pelo *software* LabFit aos dados experimentais da segunda fase.

Figura 4.60: Ajuste segunda fase (contorno).



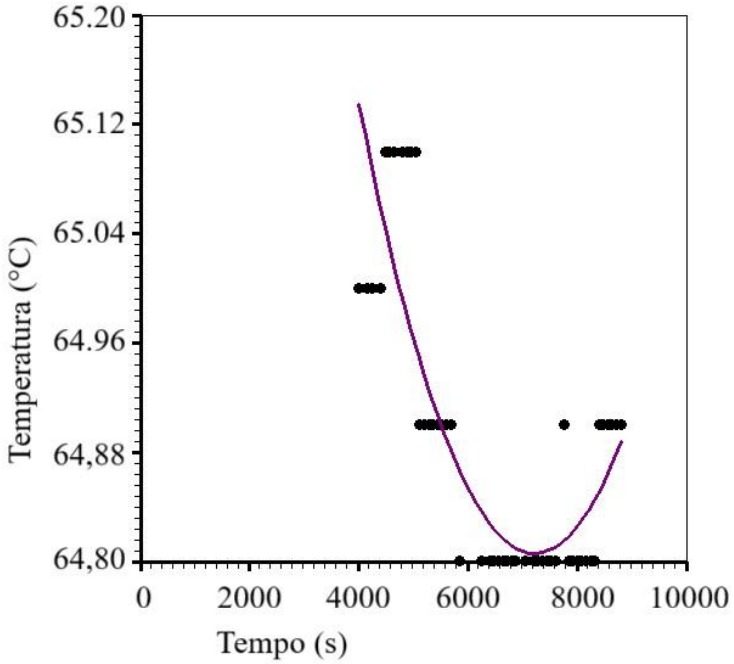
Fonte: Autoria própria.

Na segunda fase da análise, foi adotado um procedimento metodológico semelhante ao da etapa anterior, porém direcionado ao ajuste de uma função de natureza curvilínea. Inicialmente, foi identificada a região do conjunto de dados que apresentou maior indicativo de comportamento não linear, servindo como base para a definição do intervalo mais adequado à aplicação do modelo curvilíneo.

Em seguida, foi realizado um refinamento progressivo do ajuste, por meio da inclusão e exclusão controlada de pontos experimentais, com o objetivo de avaliar o impacto dessas variações sobre os parâmetros indicativos da qualidade do ajuste. Sempre que foi observada redução na qualidade do modelo, optou-se pelo retorno à configuração imediatamente anterior, por esta ter sido considerada a mais adequada para representar a relação curvilínea entre as variáveis analisadas.

A terceira fase do estudo encontra-se representada conforme ilustrado na Figura 4.61.

Figura 4.61: Ajuste terceira fase (contorno).



Fonte: Autoria própria.

Na terceira fase da análise, foi direcionado o foco ao ajuste de uma reta praticamente constante, a qual representa um comportamento estável dos dados experimentais ao longo do intervalo analisado. Essa etapa teve como objetivo identificar e confirmar a existência de uma região em que as variações dos valores medidos se mostraram pouco significativas, indicando um regime de estabilidade do fenômeno em estudo.

A divisão do contorno térmico em três etapas mostrou-se uma estratégia adequada para representar, de forma clara, as diferentes etapas do processo de transferência de calor ao longo do tempo. Cada fase corresponde a um intervalo de tempo específico, no qual o comportamento térmico do sistema apresenta características próprias, permitindo a utilização de equações ajustadas para cada fase do processo.

Essa divisão também possibilitou considerar as variações na taxa de transferência de calor e as mudanças no perfil de temperatura observadas durante o aquecimento. Dessa forma, foi possível acompanhar com maior clareza a evolução da temperatura no sistema ao longo do tempo.

Além disso, essa abordagem contribuiu para melhorar o ajuste do modelo aos dados experimentais, uma vez que cada etapa foi analisada de acordo com suas

características térmicas. Com isso, obteve-se uma representação mais adequada do comportamento térmico do sistema, reduzindo as diferenças entre os valores experimentais e os resultados calculados pelo modelo.

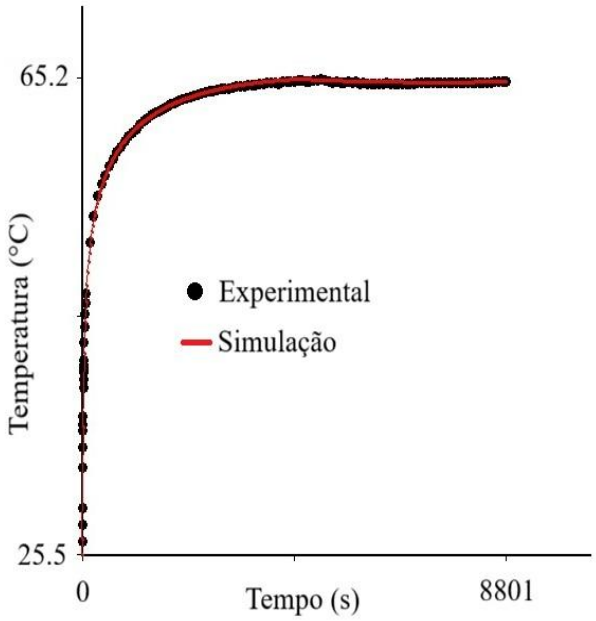
Os ajustes $\Phi(t)$ ao contorno variável passou a ser escrito:

$$\Phi_c(t) = \begin{cases} 0{,}52821\ t + 26{,}8575, \text{ se } t \leq 30; \\ 20{,}1524(\log(t + 2{,}0931)0{,}5765 - 8{,}2993 \times 10^{-4}), \text{ se } 30 < t < 4721; \\ (-1{,}6038 \times 10^{5} + t) / (-2{,}4182 \times 10^{3} + 1{,}0456 \times 10^{-4}\, t^{2}), \text{ se } t \geq 4721. \end{cases} \quad (4.1)$$

A utilização de equações específicas para cada intervalo de tempo possibilitou um melhor ajuste aos dados experimentais, contribuindo para a redução das diferenças entre os valores medidos e aqueles previstos pelo modelo matemático.

Ao final desse procedimento, foi obtido um gráfico comparativo entre os resultados experimentais e os valores simulados, apresentado na Figura 4.62, permitindo avaliar o nível de concordância entre os dados experimentais e os resultados previstos pelo modelo.

Figura 4.62: Evolução da temperatura no contorno considerando a condição de contorno de primeiro tipo variável: resultados experimentais (preto) e a função ajustada (vermelho).

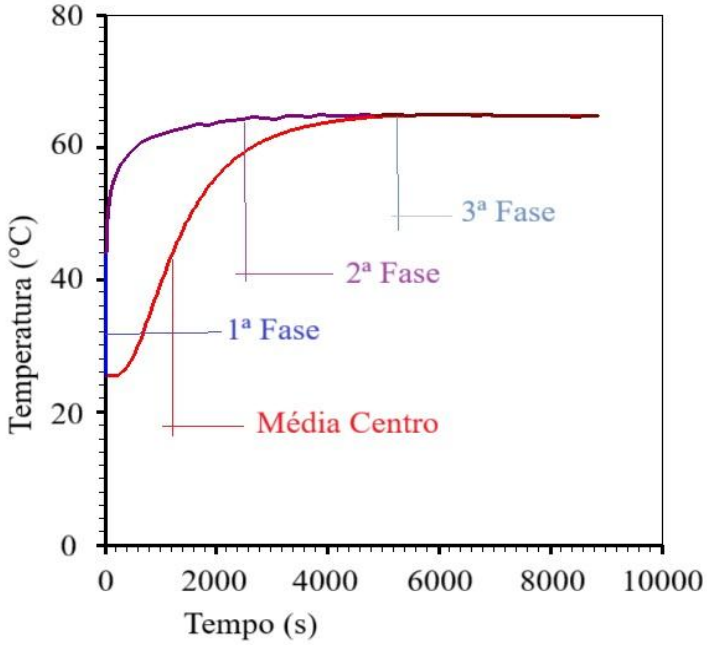


Fonte: Autoria própria.

O gráfico final evidencia elevada concordância entre as curvas obtidas e os dados experimentais, confirmando a adequação e a eficiência da metodologia aplicada.

A Figura 4.63, apresenta os dados experimentais da temperatura no centro do recipiente em função do tempo comparado com a evolução da temperatura da superfície interna do processo.

Figura 4.63: Comparativo das cinéticas no contorno e no centro.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a curva correspondente a evolução da temperatura no centro (em vermelho) apresenta aumento progressivo da temperatura, partindo de valores mais baixos e aproximando-se gradualmente de um patamar de estabilização, indicando a difusão do calor do contorno para o interior do material.

Esse comportamento confirma que a adoção do contorno variável de primeiro tipo representa adequadamente a dinâmica do aquecimento, descrevendo de forma coerente a evolução térmica observada no sistema.

É possível verificar que o ponto central permanece com a temperatura inicial durante um certo intervalo de tempo. Para garantir que todos os agentes patogênicos tenham sido inativados, é necessário aguardar até que esse ponto de interesse atinja a temperatura de equilíbrio. Quando isso ocorrer, todos os demais pontos já estarão com a mesma temperatura de equilíbrio.

A partir da função que apresentou o melhor ajuste para representar a difusividade térmica aparente ($F4 = b.\cosh(a.T)$), juntamente com a função obtida pelo ajuste dos dados experimentais da condição de contorno (Equação 4.1), utilizou-se o *software* Numerical Heat Transfer para determinar os parâmetros ótimos do processo. Os valores obtidos por meio desse procedimento de otimização estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Valores de a e b das funções da difusividade térmica para condição de contorno variável Função F4 e F1, do qui-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2).

Função	**a**	**b**	χ^2	R^2
$F4 = b.\cosh(a.T)$	7.9774×10^{-3}	1.4555×10^{-7}	3.0375815	0.9998621546
$F1 = b$	0	1.2147×10^{-7}	2.1649820	0.9998739872

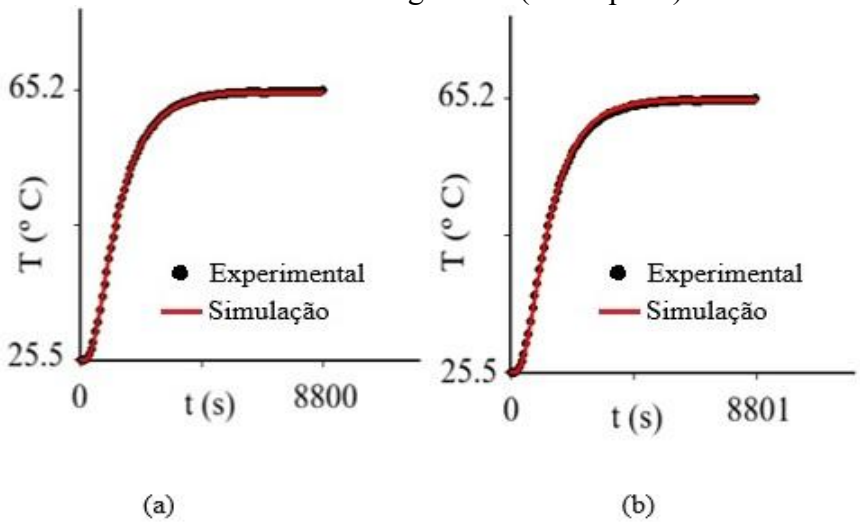
Fonte: Autoria própria.

Com esses parâmetros, foi possível determinar numericamente a evolução da temperatura no centro geométrico do recipiente contendo polpa de graviola, a partir da solução da equação de difusão aplicada ao modelo proposto. Para essa simulação, foi adotada a condição de contorno variável de primeiro tipo (Dirichlet), a qual impõe valores de temperatura prescritos na fronteira do domínio e permite representar, de forma mais realista, as variações térmicas impostas ao sistema ao longo do processo de aquecimento.

Essa abordagem possibilita a representação do comportamento transiente do sistema, uma vez que o contorno térmico é atualizado ao longo do tempo, acompanhando as diferentes fases do processo experimental. Dessa forma, o modelo consegue reproduzir com maior fidelidade a influência das condições externas sobre a distribuição interna de temperatura no material analisado.

A Figura 4.64 apresenta o ajuste entre a solução numérica proposta e os dados experimentais obtidos no centro do recipiente. O gráfico evidencia a variação da temperatura ao longo do tempo nessa região específica do sistema, permitindo avaliar a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento térmico observado experimentalmente.

Figura 4.64: Cinética de aquecimento obtido no centro da amostra pela simulação das funções (a) F4 (difusividade variável) e (b) F1(difusividade constante), considerando a contorno variável primeiro tipo. A cinética de aquecimento dos dados médios e mostrado nos dois gráficos (curva preta).



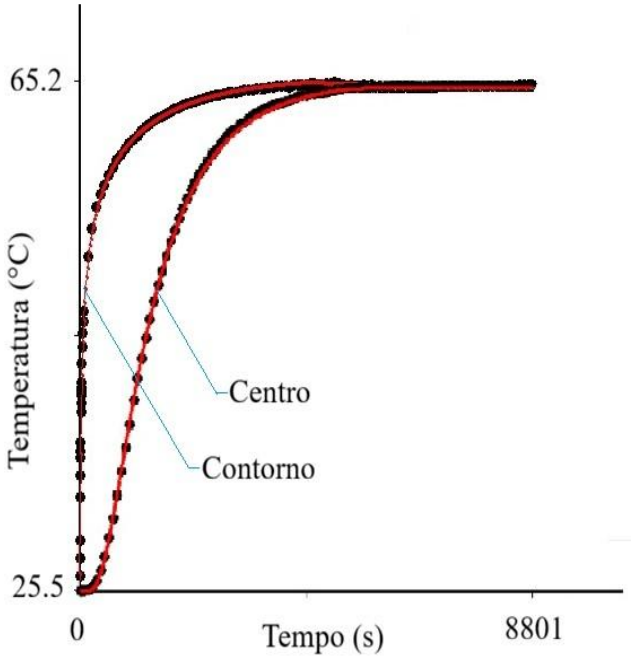
Fonte: Autoria própria.

São apresentados os resultados obtidos a partir de duas abordagens distintas: a primeira considera a difusividade térmica variável em função da temperatura local, representada pela função F4 (Figura 4.64a), enquanto a segunda considera a difusividade térmica constante, descrita pela função F1 (Figura 4.64b).

Essa comparação permite avaliar a influência da variação da difusividade térmica no comportamento térmico do sistema. Observa-se que os resultados apresentados nas Figuras (4.64a e 4.64b) mostram boa concordância entre os dados experimentais e os modelos, com curvas suaves e poucas oscilações ao longo do processo. Esse comportamento indica que o modelo adotado descreve de forma adequada a cinética de aquecimento do sistema, representando satisfatoriamente a evolução da temperatura durante o aquecimento.

A figura 4.65 apresenta as cinéticas de aquecimento obtidas por meio de simulação numérica, na qual foram reunidos, em um único gráfico, os perfis de temperatura referentes ao centro e ao contorno do recipiente. São mostrados os resultados considerando condição de contorno de Dirichlet variável e a difusividade térmica variável e a condição de contorno em função da temperatura local. Com o decorrer do tempo, ambas as regiões tendem ao equilíbrio térmico, indicando a adequada penetração de calor durante o processo.

Figura 4.65: Comparação da temperatura T em função do tempo t, no contorno e no centro os pontos pretos representam os dados experimentais, enquanto as curvas vermelhas correspondem ao ajuste do modelo utilizando condição de contorno variável de primeiro tipo (Dirichlet).



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, nos instantes iniciais do processo, a temperatura no ponto central do recipiente permanece próxima ao valor inicial de aproximadamente 25,5 °C, sem apresentar elevação imediata. À medida que o aquecimento progride, ocorre um aumento gradual da temperatura até a aproximação de um regime estacionário em torno de 65,2 °C, indicando o estabelecimento progressivo do equilíbrio térmico no centro do recipiente. É necessário garantir que o ponto central atinja a temperatura de equilíbrio para que ocorra a inativação completa dos agentes patogênicos.

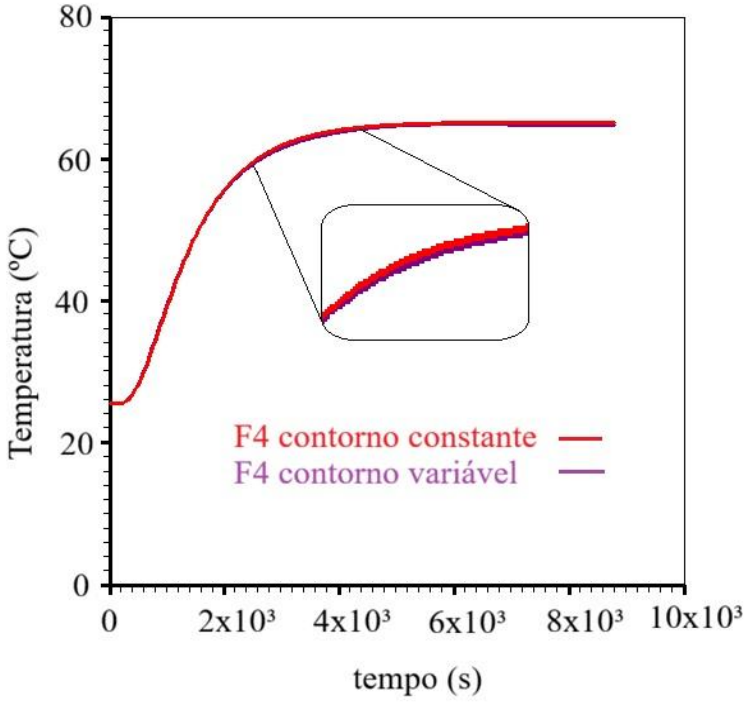
O ajuste obtido considerando a condição de contorno variável de primeiro tipo apresenta boa concordância com os dados experimentais ao longo do tempo. O leve atraso observado na elevação da temperatura, especialmente nas fases iniciais, pode ser associado às propriedades térmicas do recipiente, confeccionado em vidro. Esse material apresenta baixa condutividade térmica, atuando como uma resistência adicional à transferência de calor, de modo que parte da energia fornecida é inicialmente absorvida pelo próprio recipiente, efeito que não é plenamente representado pelo modelo utilizado.

Por sua vez, a simulação que adota condição de contorno variável considera a variação gradual da temperatura na interface entre o sistema e o meio externo,

reproduzindo de forma mais fiel o comportamento térmico observado em situações reais. Nesse caso, a distribuição de calor torna-se menos simétrica e mais complexa, evidenciando regiões com menor penetração térmica em função das oscilações naturais da temperatura de contato, o que reflete de maneira mais realista a resistência térmica do sistema e a difusão não uniforme do calor.

A Figura 4.66 apresenta o comparativo da cinética de aquecimento no centro do recipiente, obtido a partir da função difusividade $(F4 = b.\cosh(a.T))$, permitindo observar a relação entre os resultados simulados e os dados experimentais durante o processo de aquecimento.

Figura 4.66: Comparativo cinética de aquecimento da função difusividade F4 contorno variável (lilás) e contorno constante (vermelho).



Fonte: Autoria própria.

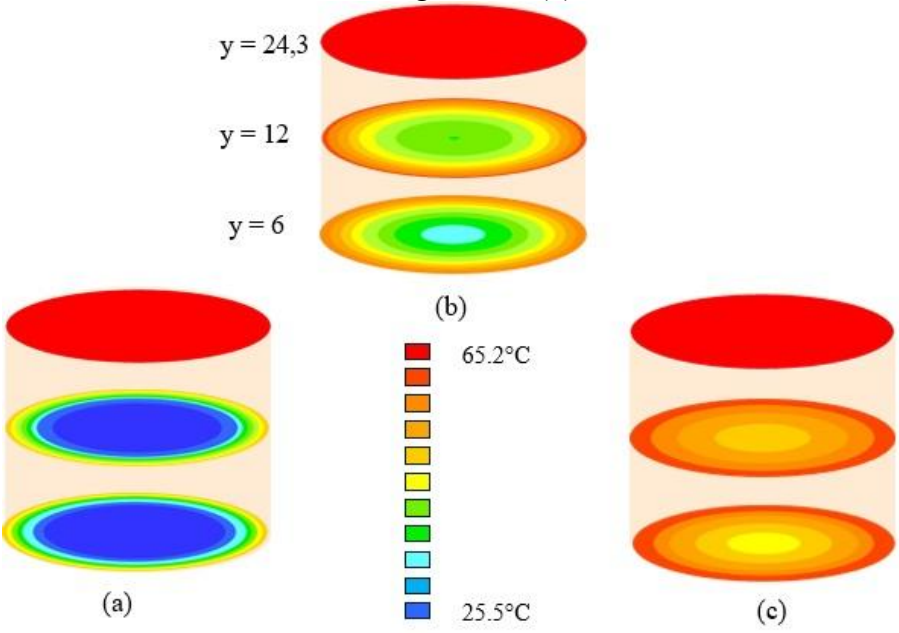
O gráfico apresenta a comparação da cinética de aquecimento no centro para as condições de contorno variável, representadas pela curva em lilás, e de contorno constante, representada pela curva em vermelho. Observa-se que ambas as curvas exibem comportamento térmico semelhante ao longo do tempo, com lento aumento da temperatura nos instantes iniciais do processo, seguido por uma tendência de estabilização em patamares mais elevados.

No entanto, pequenas diferenças podem ser identificadas entre os dois modelos, especialmente nas regiões intermediárias do aquecimento, indicando que a consideração do contorno variável influência de forma mais sensível a evolução térmica do sistema. Ainda assim, o bom alinhamento entre as curvas evidencia que a função F4 é capaz de representar adequadamente a difusividade térmica aparente para obtenção da cinética de aquecimento em ambas as condições de contorno, mantendo coerência com o comportamento térmico observado experimentalmente.

4.8.3 Curvas isotérmicas da cinética de penetração de calor

A Figura 4.67 apresenta as curvas isotérmicas nos planos y = 6 mm e y = 12 mm, nos instantes de tempo de (a) 3 minutos e 04 segundos, (b) 12 minutos e 02 segundos e (c) 22 minutos, durante o processo de aquecimento. Para ambas as alturas analisadas, foram considerados os mesmos instantes de tempo, possibilitando a comparação da distribuição de temperatura entre os dois planos do recipiente. Os resultados foram obtidos considerando condição de contorno variável, o que permite uma representação mais realista da evolução térmica do sistema ao longo do tempo.

Figura 4.67: Mostra as curvas isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 6mm e 12 mm) nos instantes de tempos de (a) 3 minutos 04 segundos (b) 12 minutos e 02 segundos e (b) 22 minutos.

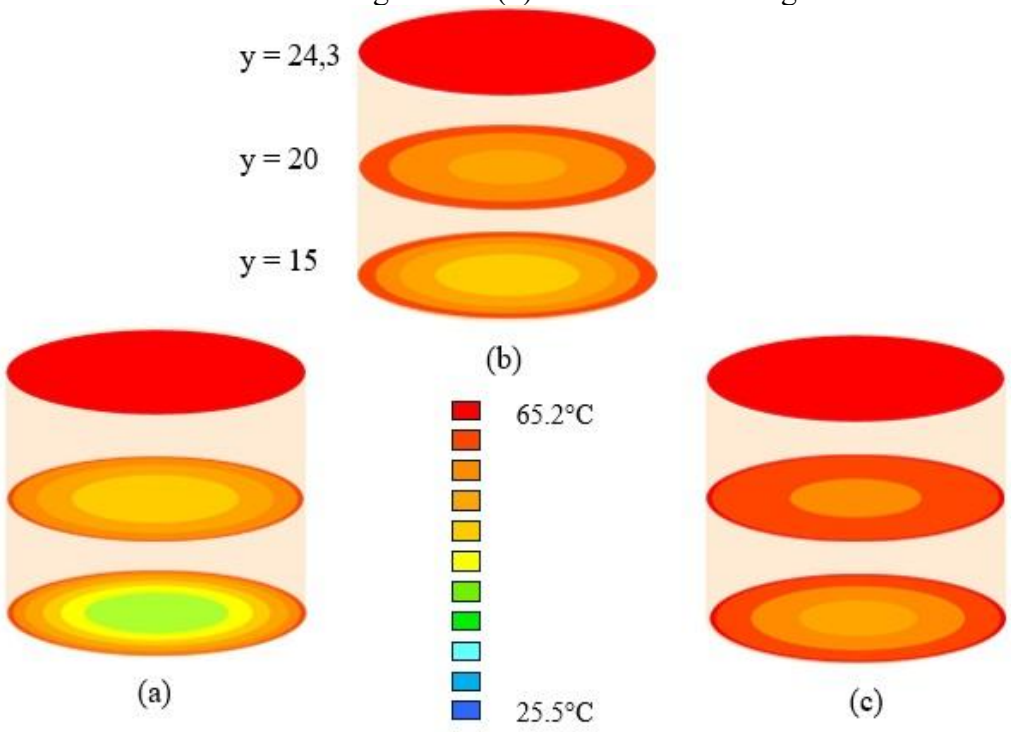


Fonte: Autoria própria.

Desse modo, em um mesmo plano, volumes de controle localizados mais próximos da superfície interna atingem a temperatura de equilíbrio térmico em menor intervalo de tempo. Isso ocorre devido à maior proximidade com a fonte de calor. Já as regiões mais afastadas da superfície apresentam aquecimento mais lento ao longo do processo. Dessa forma, observa-se uma diferença no tempo necessário para que cada região do material alcance o equilíbrio térmico.

A Figura 4.68 apresenta os contornos das curvas isotérmicas, nos planos (y = 15 mm e 20 mm) nos instantes de tempos de (a) 12 minutos 02 segundos (b) 18 minutos e 02 segundos e (b) 24 minutos e 03 segundos. Esses contornos mostram como a temperatura está distribuída nas diferentes regiões do sistema nesse momento do processo.

Figura 4.68: Mostra as curvas isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 15 mm e 20 mm) nos instantes de tempos de (a) 12 minutos 02 segundos (b) 18 minutos e 02 segundos e (b) 24 minutos e 03 segundos.



Fonte: Autoria própria.

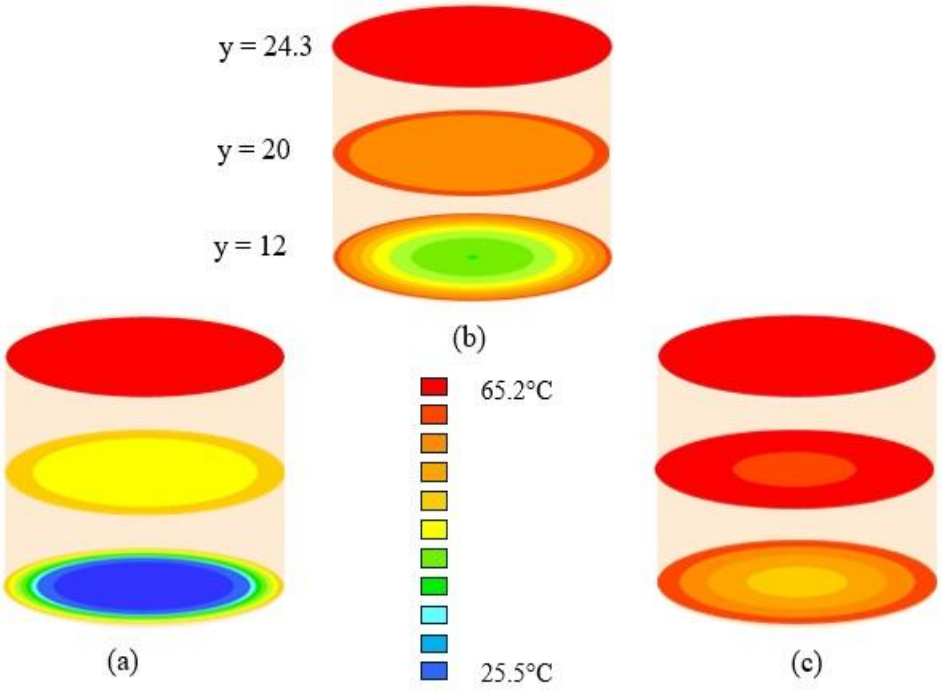
Observam-se diferenças claras entre as curvas isotérmicas nos planos avaliados, sendo que, no plano mais próximo da superfície interna do recipiente, a polpa atinge a temperatura de equilíbrio térmico em menor intervalo de tempo. Esse comportamento

indica que as regiões próximas ao contorno são aquecidas mais rapidamente durante o processo. Já as áreas localizadas mais ao centro apresentam aquecimento mais gradual ao longo do tempo.

Na Figura 4.69 são apresentados os contornos das curvas isotérmicas no plano correspondente a aproximadamente um quarto do cilindro (y = 12 mm) e no centro do cilindro (y = 24,3 mm), para os instantes de tempo de (a) 3 minutos e 04 segundos, (b) 12 minutos e 02 segundos e (c) 22 minutos. Esses contornos permitem analisar a evolução da distribuição de temperatura no sistema ao longo do processo de aquecimento.

Ressalta-se que os mesmos instantes de tempo foram considerados para as duas alturas avaliadas, o que possibilita uma análise comparativa da distribuição térmica entre os diferentes planos do recipiente, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento térmico do sistema.

Figura 4.69: Mostra as curvas isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 12 mm e 20 mm) nos instantes de tempos de (a) 3 minutos 04 segundos (b) 12 minutos e 02 segundos e (b) 22 minutos.



Fonte: Autoria própria.

A análise das curvas apresentadas na Figura 4.69 indica que, com o avanço do tempo de aquecimento, os planos localizados mais próximos do contorno do recipiente tendem a atingir mais rapidamente temperaturas próximas da condição de equilíbrio

térmico. Em instantes mais avançados do processo (Figura 4.69c), observa-se que praticamente todos os pontos da polpa de graviola nesses planos já alcançaram ou estão próximos da temperatura de equilíbrio. Nos demais planos analisados, entretanto, apenas parte da polpa atinge essa condição, evidenciando a presença de gradientes de temperatura no interior do sistema durante o aquecimento.

Além disso, verifica-se que os perfis das curvas isotérmicas variam conforme a posição do plano analisado ao longo do recipiente. Esse comportamento indica que a distribuição de temperatura no interior do sistema não ocorre de forma uniforme, sendo influenciada pela proximidade com a superfície aquecida e pela posição espacial considerada na análise.

4.8.4 Análise da Simulação de Penetração de Calor em Polpa de Graviola sob Tratamento Térmico.

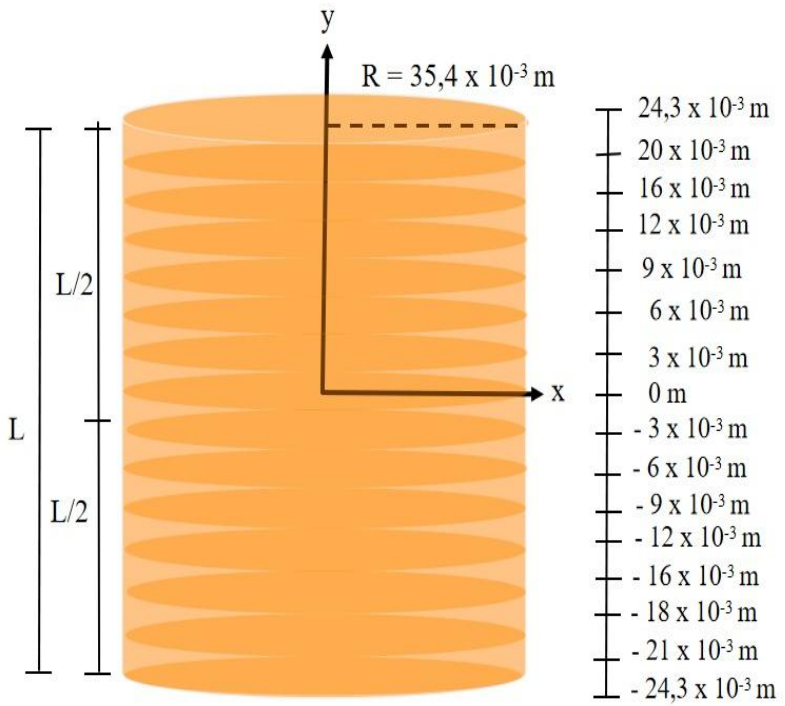
A simulação apresentada na Figura 4.70 refere-se ao estudo da distribuição de temperatura no interior de um recipiente cilíndrico de vidro contendo polpa de graviola, submetido ao processo de pasteurização em banho-maria utilizando um equipamento do tipo Kacil. O principal objetivo dessa análise foi avaliar o comportamento da transferência de calor durante o aquecimento da amostra, observando a propagação da energia térmica do meio externo aquecido para o interior do produto ao longo do tempo. Para isso, foram consideradas duas condições distintas de contorno térmico: contorno constante e contorno variável do primeiro tipo, permitindo comparar o comportamento térmico da polpa em diferentes condições de aquecimento.

O recipiente utilizado na simulação foi modelado geometricamente como um cilindro de altura total L e raio R, adotando-se como referência o plano central y = 0. A análise da penetração térmica foi realizada ao longo do eixo vertical y, considerando diferentes posições no interior do recipiente, localizadas nas alturas de 3 mm, 6 mm, 12 mm, 16 mm e 20 mm, conforme ilustrado na Figura 4.70. Essas posições foram escolhidas para permitir o acompanhamento da evolução da temperatura em diferentes regiões da amostra durante o processo de aquecimento.

A partir dessa configuração, foi possível analisar a difusão do calor das extremidades do recipiente em direção à região central da polpa, identificando as diferenças de aquecimento entre as regiões mais próximas da superfície e o centro

geométrico da amostra, considerado o ponto menos favorecido termicamente. Dessa forma, a simulação contribui para a compreensão do comportamento térmico do sistema e para a avaliação da eficiência do processo de pasteurização aplicado à polpa de graviola.

Figura 4.70: Modelo de Simulação da Penetração de Calor em Geometria Cilíndrica.



Fonte: Autoria própria.

4.8.5 Simulação distribuição de calor com contorno variável de primeiro tipo.

Para a análise do comportamento da distribuição de temperatura nas diferentes regiões da amostra durante o processo de aquecimento, foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de acompanhar a evolução térmica ao longo do tempo. Essa abordagem permitiu observar diferentes estágios da propagação de calor no interior do cilindro, possibilitando compreender a dinâmica do processo de aquecimento e a redistribuição térmica no material.

Além da análise espacial, foram considerados instantes específicos de tempo para acompanhar a evolução do aquecimento conforme apresentado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Relação dos instantes de tempo em minutos e segundos.

Tempo (s)	Tempo (minutos e segundos)
607,269 s	10 minutos e 07 segundos.
906,503 s	15 minutos e 06 segundos.
1205,737 s	20 minutos e 06 segundos.
1504,971 s	25 minutos e 05 segundos.

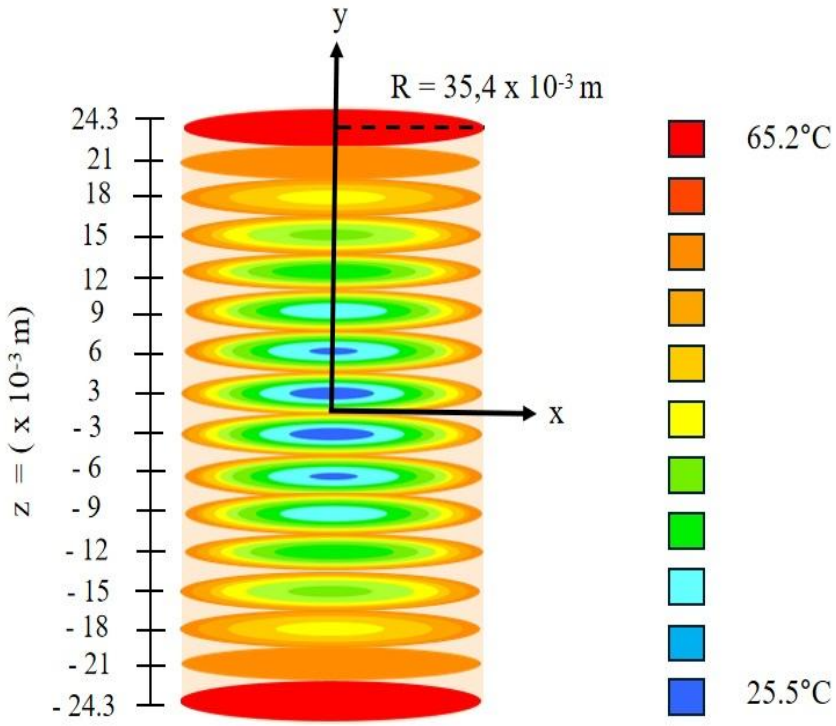
Fonte: Autoria própria.

Os tempos selecionados representam diferentes etapas do regime térmico durante o processo de pasteurização da polpa de graviola. O primeiro instante corresponde ao início do aquecimento, fase em que ocorre a propagação inicial do calor da superfície do recipiente para o interior da amostra, permitindo observar os primeiros gradientes térmicos formados no sistema. Os tempos posteriores possibilitam acompanhar a difusão progressiva do calor ao longo do cilindro e a redução gradual das diferenças de temperatura entre as regiões externas e o centro da amostra. Dessa forma, torna-se possível avaliar a evolução do aquecimento ao longo do tempo e identificar o comportamento térmico das diferentes regiões do recipiente durante o processo de pasteurização.

A análise das variações espaciais e temporais da temperatura permitiu compreender o comportamento da condução térmica desde o regime transitório inicial até condições próximas do regime quase estacionário, contribuindo para a interpretação física do fenômeno e para a validação dos resultados obtidos na simulação numérica. Observa-se que, com o avanço do tempo de aquecimento, os gradientes térmicos tornam-se menos acentuados, indicando uma tendência de uniformização da temperatura no interior da amostra.

A Figura 4.71 apresenta a simulação da penetração de calor em um cilindro contendo polpa de graviola, considerando uma condição de contorno variável de primeiro tipo, após 10 minutos de aquecimento. A distribuição de temperatura é representada por mapas de calor, evidenciando gradientes térmicos entre 25,5 °C e 65,2 °C. Observa-se que as regiões próximas à superfície apresentam temperaturas mais elevadas, enquanto a região central permanece com temperaturas inferiores devido à menor velocidade de propagação do calor. Esse comportamento evidencia que o aquecimento ocorre inicialmente nas regiões externas do cilindro, avançando gradualmente em direção ao centro geométrico da amostra.

Figura 4.71: Contornos das isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 10 minutos e 06 segundos.

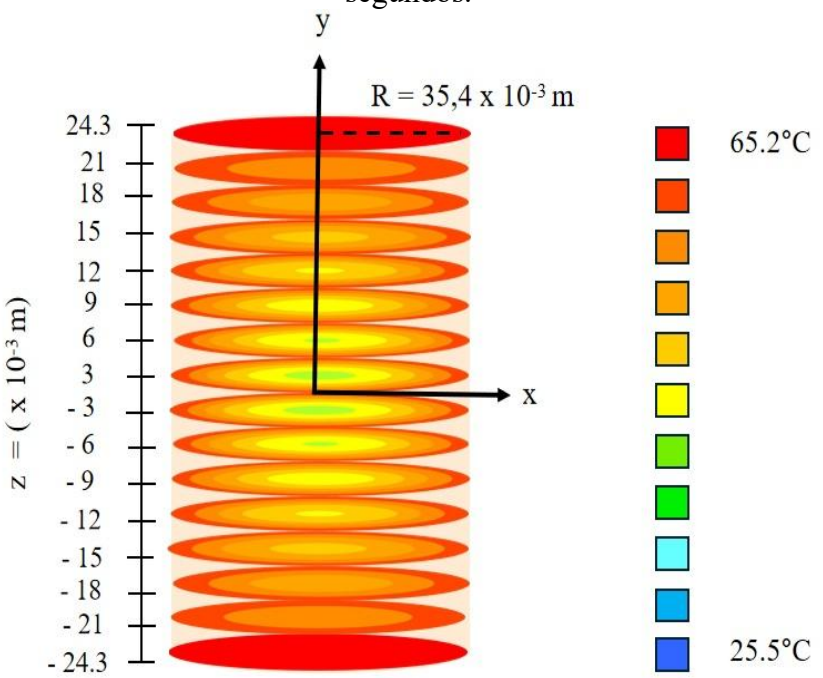


Fonte: Autoria própria.

A temperatura no interior da amostra não atinge rapidamente a temperatura da superfície devido à resistência térmica do material do recipiente, que retarda a transferência de calor para o produto. No início do processo, parte da energia térmica é absorvida pelo próprio recipiente antes de ser conduzida à amostra, ocasionando um atraso no aquecimento interno. Dessa forma, o calor se propaga gradualmente da região externa em direção ao centro do cilindro por condução térmica, fazendo com que as camadas próximas à superfície aqueçam primeiro, enquanto as regiões internas apresentam aquecimento mais lento.

A Figura 4.72 apresenta a simulação da distribuição de temperatura no interior de um cilindro contendo polpa de graviola no instante de 20 minutos e 05 segundos após o início do processo. Observa-se que a região central ainda apresenta pequena variação de temperatura, indicando que o calor proveniente das extremidades ainda não se distribuiu de maneira uniforme em todo o volume, evidenciando que o aquecimento ocorre de forma gradual.

Figura 4.72: Contornos das isotérmicas da funções F4 (difusividade variável) nos planos (y = 3 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm e 24.3 mm), representando a distribuição de temperatura na polpa da graviola no instante de tempo: 20 minutos e 06 segundos.

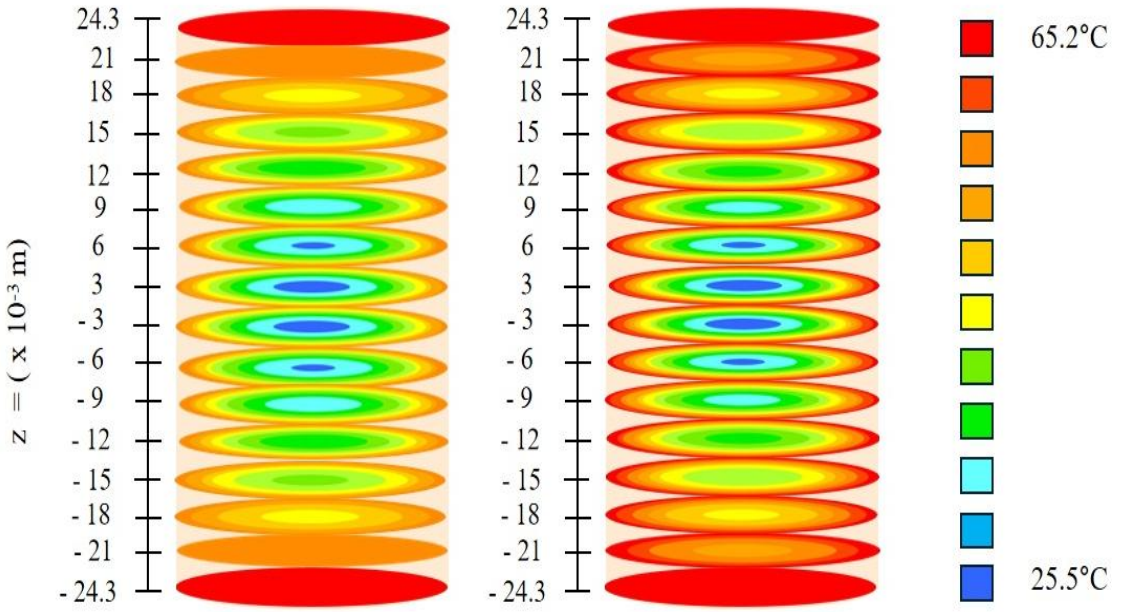


Fonte: Autoria própria.

Esse comportamento ocorre devido à adoção de uma condição de contorno do primeiro tipo, na qual a temperatura nas superfícies do cilindro é previamente definida e controlada ao longo do processo. Nessa condição, o calor é transferido inicialmente das superfícies externas para o interior do produto, propagando-se gradualmente em direção à região central da amostra. Como consequência, a distribuição de temperatura obtida na simulação apresenta comportamento mais representativo das condições reais de aquecimento durante o processo de pasteurização.

A Figura 4.73 apresenta a comparação entre as condições de contorno de temperatura constante e de temperatura variável de primeiro tipo, considerando o aquecimento de um cilindro contendo polpa de graviola no instante de 10 minutos e 07 segundos após o início do processo. Observa-se que cada condição de contorno influencia de maneira distinta a penetração do calor e a formação dos gradientes térmicos no interior do produto, afetando tanto as regiões próximas à superfície quanto a região central do cilindro. Além disso, as diferenças observadas entre os perfis térmicos evidenciam a importância da escolha adequada das condições de contorno na representação numérica do processo de transferência de calor.

Figura 4.73: Comparação da distribuição de temperatura no interior do cilindro, obtida por simulação da transferência de calor, no instante de 10 minutos e 07 segundos de processo: (a) condição de contorno variável e (b) condição de contorno constante.

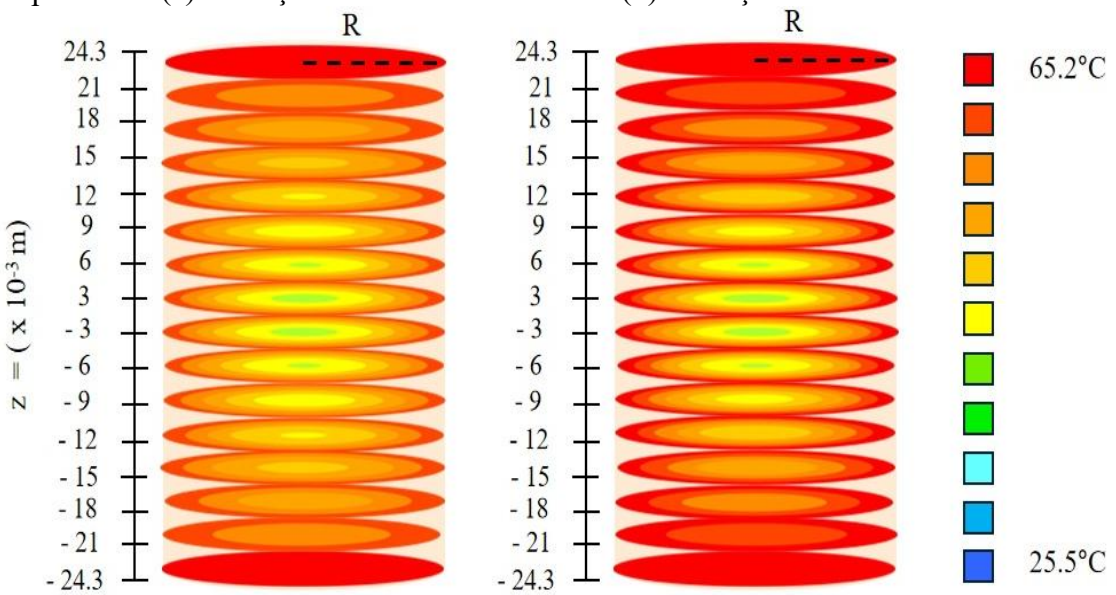


Fonte: Autoria própria.

Para a condição de contorno com temperatura variável do primeiro tipo (Figura 4.73a), observa-se que o aquecimento do cilindro ocorre de forma gradual, com diferenças claras entre a região superficial e a região central, indicando que o calor se propaga lentamente para o interior à medida que a temperatura na superfície varia ao longo do tempo. Esse comportamento resulta em um perfil de temperatura mais suave e próximo da realidade do processo. Por outro lado, no contorno com temperatura constante (Figura 4.73b), o aquecimento é mais intenso nas regiões próximas à superfície desde os instantes iniciais, o que gera um gradiente térmico mais elevado em direção ao centro do cilindro, favorecendo uma penetração de calor mais rápida no material.

A Figura 4.74 compara a simulação da distribuição de temperatura no interior de um cilindro após 20 minutos de aquecimento. Observa-se que o calor se propaga da superfície para o centro, resultando em um aquecimento mais intenso nas regiões externas.

Figura 4.74: Comparação da distribuição de temperatura no interior do cilindro, obtida por simulação da transferência de calor, no instante de 20 minutos e 05 segundos de processo: (a) condição de contorno variável e (b) condição de contorno constante.



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

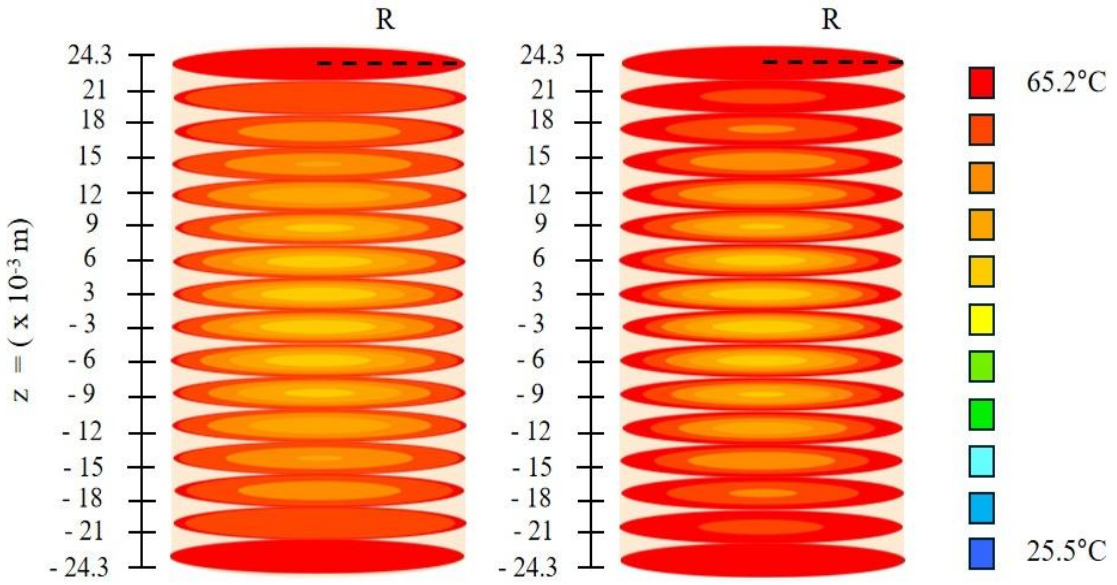
Observa-se que o comportamento difere entre as duas condições de contorno analisadas, quanto à penetração de calor. Na condição de temperatura constante (Figura 4.74b), a manutenção da superfície em um valor fixo favorece uma transferência de calor mais rápida para o interior do cilindro. Já na condição de contorno com temperatura variável de primeiro tipo (Figura 4.74a), o aumento gradual da temperatura superficial resulta em uma penetração de calor mais lenta, tornando o aquecimento mais próximo do observado em processos reais envolvendo produtos alimentícios.

A Figura 4.75 apresenta a comparação, por meio de simulação, das variações de temperatura em função do tempo, considerando contorno constante e contorno variável. O objetivo de proporcionar uma melhor compreensão das diferenças térmicas observadas em cada experimento.

Nas pasteurizações realizadas, observa-se nos gráficos de temperatura em função do tempo obtidos na superfície interna do recipiente que a borda interna não assume imediatamente a temperatura da água após a imersão. Inicialmente, a temperatura apresenta um crescimento lento durante determinado período até um patamar intermediário; apenas após determinado tempo, atinge o equilíbrio térmico. Segundo Costa (2015) essa situação pode ser adequadamente aproximada por uma

condição de contorno do primeiro tipo variável, sendo esse modelo mais realista para representar o processo.

Figura 4.75: Comparação da distribuição de temperatura no interior do cilindro, obtida por simulação da transferência de calor, no instante de 25 minutos e 05 segundos de processo: (a) condição de contorno variável e (b) condição de contorno constante.



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

A distribuição de temperatura evidencia a presença de gradientes térmicos nas direções radial e axial, indicando que o calor se propaga principalmente das superfícies laterais e das extremidades do cilindro para o interior do produto. Esse comportamento reflete o mecanismo de transferência de calor característico de sistemas cilíndricos submetidos a aquecimento externo.

A adoção da condição de contorno de primeiro tipo, com temperatura variável ao longo do tempo, mostra-se mais vantajosa do ponto de vista físico, uma vez que representa de forma mais adequada o processo real. Em tratamentos térmicos por banho-maria, a temperatura do fluido externo não se mantém constante durante todo o processo, especialmente nos instantes iniciais do aquecimento.

O modelo que considera a condição de contorno variável de primeiro tipo leva em conta essa variação natural da temperatura, permitindo reproduzir com maior fidelidade a dinâmica térmica do processo. Dessa forma, torna-se possível identificar

com maior precisão os pontos frios no interior do produto, que são determinantes para a eficiência microbiológica do tratamento térmico.

Com base na análise realizada, verifica-se que a simulação baseada na condição de contorno variável de primeiro tipo apresenta resultados mais confiáveis e próximos da realidade experimental, mostrando-se mais adequada para o dimensionamento e a validação de processos térmicos em alimentos.

4.9 Efeito da pasteurização sobre a composição físico-química

Para avaliar o efeito da pasteurização sobre a composição físico-química da polpa de graviola, foram realizadas análises centesimais e determinações de parâmetros relacionados à qualidade e à estabilidade do produto. Essas análises permitem verificar possíveis alterações nos teores de umidade, proteínas, lipídeos e cinzas, bem como nos valores de acidez, pH e atividade de água, possibilitando inferir se o tratamento térmico comprometeu as características nutricionais e físico-químicas da polpa. A Tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos para a polpa de graviola in natura (PGI) e para a polpa de graviola pasteurizada (PGP), permitindo a comparação estatística entre os tratamentos e a avaliação da eficiência do processo de pasteurização na preservação da qualidade do alimento.

Tabela 4.12: Composição centesimal das polpas de graviola.

Parâmetros	**PGI**	**PGP**
Umidade (%)	87,5±0,06	87,2±0,06
Cinzas (%)	0,59±0,02	0,60±0,05
Proteínas (%)	0,85±0,01	1,13±0,01*
Lipídeos (%)	ND	ND
Acidez (%)	1,47±0,00*	1,27±0,00
Atividade de água	0,980±0,01	0,970±0,01
pH	3,6±0,02	3,7±0,02*

GPI: Polpa de graviola *in natura*; PGP: Polpa de graviola pasteurizada. ND: Não Detectado. *Média ±desvio-padrão com * na mesma linha diferem entre si pelo teste de *T-Student* ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos.

As análises físico-químicas da polpa de graviola *in natura* (PGI) e após pasteurização (PGP) mostraram que a umidade ($87,5 \pm 0,06\%$ e $87,2 \pm 0,06\%$,

respectivamente) e as cinzas ($0,59 \pm 0,02\%$ e $0,60 \pm 0,05\%$) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), indicando que o processo térmico empregado não alterou o conteúdo de água e minerais da polpa. Já os teores de proteína foram significativamente maiores na PGP ($1,13 \pm 0,01\%$) em comparação à PGI ($0,85 \pm 0,01\%$; $p \leq 0,05$), possivelmente devido à concentração relativa causada pela redução de água livre ou alterações conformacionais que aumentam a detectabilidade proteica (Martins; Oliveira, 2021). A acidez total diminuiu após pasteurização ($1,47 \pm 0,00\%$ para $1,27 \pm 0,00\%$; $p \leq 0,05$), o que pode refletir a degradação parcial de ácidos orgânicos sensíveis ao calor, como ácido cítrico, ou reações de tamponamento decorrentes da pasteurização (Silva *et al.,* 2020).

O pH apresentou aumento significativo após pasteurização ($3,6 \pm 0,02$ para $3,7 \pm 0,02$; $p \leq 0,05$), corroborando a redução da acidez e indicando estabilidade relativa do sistema aquoso da polpa. A atividade de água (aw) diminuiu levemente de $0,980 \pm 0,01$ para $0,970 \pm 0,01$, embora sem diferença estatisticamente significativa, permanecendo em valores que ainda favorecem o crescimento microbiano, caso não haja processamento adicional ou refrigeração adequada (Jay *et al.,* 2020).

Os resultados apresentados na Tabela 4.13 indicam que a pasteurização impactou significativamente o teor de compostos fenólicos totais da polpa de graviola. A polpa *in natura* (PGI) apresentou $90,62 \pm 1,77$ mg EGA/100 g, enquanto a polpa pasteurizada (PGP) apresentou $74,28 \pm 0,23$ mg EGA/100 g, mostrando uma redução estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$). Essa diminuição pode ser atribuída à degradação térmica de fenólicos sensíveis ao calor ou à sua ligação com outros componentes da matriz, reduzindo a disponibilidade para quantificação (Corrales *et al.,* 2008).

Tabela 4.13: Teor de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante total das polpas de graviola.

Parâmetros	**PGI**	**PGP**
Fenólicos Totais (mgAGE/100g)[1]	90,62 ±1,77*	74,28 ±0,23
FRAP (µmol TEAC/g) [2]	0,16 ±0,00*	0,15 ±0,00

PGI = Polpa de graviola *in natura*; PGP = Polpa de graviola pasteurizada. Os resultados são expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico (GAE) por cem gramas de amostra (mg EGA/100 g); Abreviaturas: FRAP - capacidade redutora férrica do plasma; ABTS•+ - ácido 2,2-azino-bis(3-etilbenzo-tiazolina) – 6 – sulfônico. *Média ± desvio-padrão com * na mesma linha diferem entre si pelo teste de *T-Student* ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos.

A atividade antioxidante avaliada pelos métodos FRAP e ABTS também foi afetada pelo tratamento térmico. Para FRAP, a PGI apresentou $0{,}16 \pm 0{,}00$ µmol TEAC/g e a PGP $0{,}15 \pm 0{,}00$ µmol TEAC/g, enquanto para ABTS a PGI mostrou $0{,}20 \pm 0{,}00$ µmol TEAC/g frente a $0{,}12 \pm 0{,}00$ µmol TEAC/g na PGP. Nos três parâmetros, os valores da PGI foram significativamente superiores aos da PGP ($p \leq 0{,}05$), evidenciando que a pasteurização reduziu a capacidade antioxidante total, provavelmente devido à oxidação térmica de compostos fenólicos e outros antioxidantes termosensíveis (Ma *et al.,* 2015).

Em comparação com outros estudos internacionais, a redução observada é consistente com pesquisas que demonstram perdas moderadas de fenólicos e antioxidantes em polpas de frutas tropicais submetidas a pasteurização convencional, reforçando a importância do controle de temperatura e tempo para maximizar a retenção de compostos bioativos (Vicente *et al.,* 2009).

A contagem padrão em placas revelou diferenças significativas na carga bacteriana entre a polpa de graviola *in natura* (IN) e a polpa submetida à pasteurização (TT). A polpa *in natura* apresentou uma contagem de 2.500 UFC/g, enquanto a polpa pasteurizada apresentou menos de 10 UFC/g, evidenciando uma redução superior a 99,6% da carga microbiana após o tratamento térmico. Este resultado indica que a pasteurização foi altamente eficaz na eliminação de microrganismos aeróbios totais, garantindo a segurança microbiológica do produto (Tabela xx). Nas figuras xxx e xxx também pode-se observar os resultados.

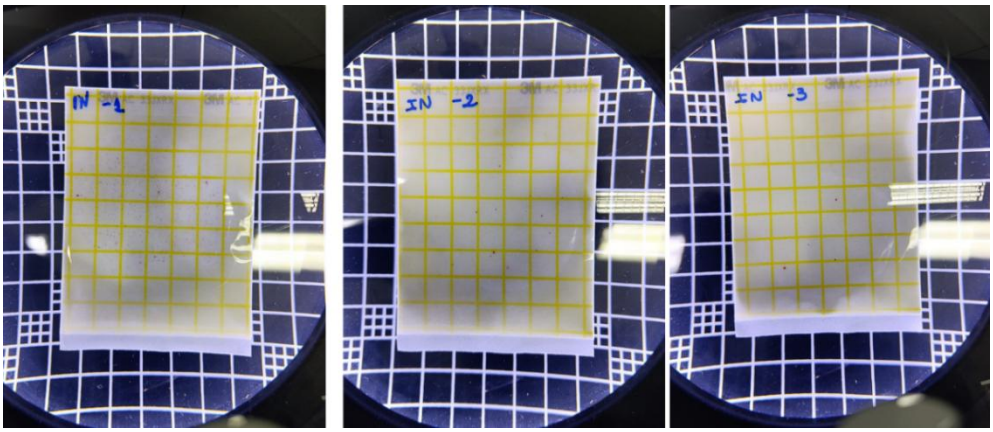
Tabela 4.14: Contagem padrão em placas de polpa de graviola in natura e submetida à pasteurização

Análise	**IN**	**TT**
Contagem padrão em placas (UFC/g)	2.500	< 10

A significativa redução da contagem bacteriana pode ser atribuída à sensibilidade térmica de bactérias vegetativas presentes na polpa, as quais são inativadas por temperaturas moderadas aplicadas durante a pasteurização, sem necessidade de processos mais extremos que poderiam comprometer atributos sensoriais e nutricionais (Koutchma, 2010). Estudos corroboram que a pasteurização de polpas de frutas tropicais reduz drasticamente a carga microbiana, mantendo a qualidade nutricional do produto (Rastogi *et al.,* 2007).

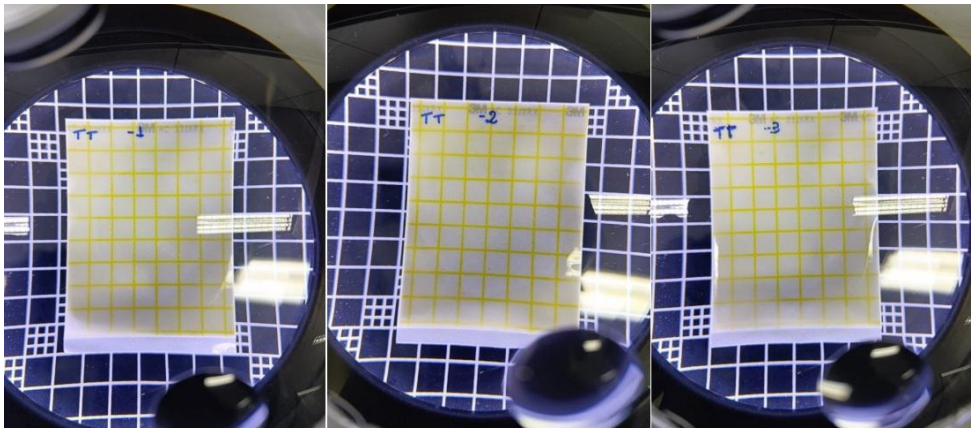
As Figuras 4.76 e 4.77 apresentam os resultados microbiológicos da polpa de graviola antes e após a pasteurização.

Figura 4.76: Placas de Petrifilm AC Contagem de Aeróbios positivas para bactérias totais amostr*a in natura.*



Fonte: Laboratório de Análise de alimentos - UNIESP.

Figura 4.77: Placas de Petrifilm AC Contagem de Aeróbios negativas para bactérias totais amostra tratado termicamente.



Fonte: Laboratório de Análise de alimentos - UNIESP.

Tais resultados confirmam a eficácia do binômio tempo/temperatura empregado no processo de sanitização e estabilização microbiológica da polpa, assegurando a redução da microbiota inicial a níveis não detectáveis pelos métodos convencionais de plaqueamento (Petrifilm AC).

4.10 A equação de Riedel.

Para este trabalho, foi realizado o estudo do teor de umidade da polpa de graviola. O teor de umidade (X) de um produto pode ser expresso em base úmida ou

em base seca. Quando expresso em base úmida, é definido como a relação entre a massa de água e a massa total do produto (MÖHLER, 2010), conforme a equação:

$$X_{bu} = {}^{m_{água}}/_{m_t} \quad (4.2)$$

onde,

X_{bu} → teor de umidade
$m_{água}$ → massa de água
m_t → massa total do produto.

Inicialmente, foram pesados os cadinhos vazios, obtendo-se uma massa de 5,004 g. Em seguida, cada cadinho foi pesado contendo a amostra úmida de polpa de graviola, obtendo-se 30,789 g.

As amostras foram submetidas ao processo de secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. Após a secagem, os cadinhos com as amostras permaneceram no dessecador por 15 minutos para resfriamento, evitando a absorção de umidade do ambiente. Em seguida, verificou-se a massa dos cadinhos com a amostra seca, obtendo-se 8,731 g.

O procedimento foi realizado em três ensaios independentes. A massa da amostra úmida (massa inicial) e da amostra seca (massa seca) foi calculada subtraindo-se a massa do cadinho vazio:

Massa inicial = $30{,}789 - 5{,}004 = 25{,}785$ g
Massa seca = $8{,}731 - 5{,}004 = 3{,}727$ g

Com base nesses valores, o teor de umidade médio da polpa de graviola foi determinado pela Equação (4.3):

$$X = \frac{25{,}785 - 3{,}727}{25{,}785} \approx 0{,}85545859\ (85{,}5\%) \quad (4.3)$$

Considerando o modelo proposto por Riedel (1969), foi desenvolvido um método que permite estimar a difusividade térmica de uma ampla variedade de

alimentos, a partir da difusividade térmica da água e do teor de água em base úmida, na temperatura desejada.

De acordo com Kiostaropoulos e Saravacos (1997) e da Silva *et al.,* (2020) a difusividade térmica (α) de um produto pode ser estimada através da correlação de Riedel, que tem a Equação (4.4):

$$\alpha = 8{,}8 \times 10^{-8} + 6{,}0 \times 10^{-8} \cdot X \qquad (4.4)$$

onde α é a difusividade térmica ($m^2\ s^{-1}$) e X é o teor de umidade do produto em base úmida, escrito na forma decimal. Fazendo $X = 0{,}85545859$ na equação de Riedel, vamos encontrar a difusividade térmica estimada ($m^2 s^{-1}$) para a polpa da graviola utilizada no presente trabalho. Então temos que a difusividade estimada e:

$$\alpha_{\text{estimada}} = 1{,}3927 \times 10^{-7}\ m^2 s^{-1} \qquad (4.5)$$

A difusividade térmica experimental (α_{exp}) da polpa de graviola foi obtida por meio da média aritmética dos valores de difusividade calculados nas seis experiências realizadas considerando o contorno do primeiro tipo constante (Equação 4.6). Esse método foi adotado porque permite reduzir pequenas variações entre os ensaios, fornecendo um valor adequado para a análise realizada. Então,

$$\alpha_{exp} = \frac{(1{,}214 + 1{,}212 + 1{,}213 + 1{,}211 + 1{,}218 + 1{,}218)}{6} = 1{,}2147 \times 10^{-7}\ m^2 s^{-1} \qquad (4.6)$$

O valor obtido para a difusividade térmica constante, considerando contorno do primeiro tipo constante, foi de $1{,}2146 \times 10^{-7}\ m^2 s^{-1}$, que é aproximo do valor obtido pela Equação 4.6.

Para o caso da difusividade variável obtida considerando contorno do primeiro tipo variável, foi calculada a média da difusividade (função F4) através da Equação 4.7.

$$\alpha_{méd} = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \alpha(x)dx \tag{4.7}$$

O valor médio obtido através da Equação (4.7) foi a seguinte:

$$\alpha_{médio} = 1{,}5583 \times 10^{-7} \ \ m^2 s^{-1} \tag{4.8}$$

Finalmente foi calculada a média dos valores das difusividades obtidas para o modelo mais simples (difusividade constante e contorno constante) e modelo mais complexo (difusividade variável e contorno variável), Equação (4.8), e a difusividade térmica experimental Equação (4.6). Esse valor foi determinado somando-se as duas difusividades e dividindo-se o resultado por dois.

$$\alpha_{médio} = \frac{1{,}2147 \times 10^{-7} + 1{,}558\ 10^{-7}}{2} = 1{,}386 \times 10^{-7}\ m^2 s^{-1} \tag{4.8}$$

O valor obtido mostrou-se muito próximo daquele estimado pela equação de Riedel, o que indica boa concordância entre os resultados experimentais e a modelagem adotada, reforçando a adequação do procedimento utilizado.

A discrepância percentual estimada Equação (4.9) é então:

$$e = \frac{|1{,}386 - 1{,}392|}{1{,}392} \times 100 = 0{,}43\ \% \tag{4.9}$$

Esse baixo percentual evidencia a boa concordância entre os métodos utilizados e reforça a confiabilidade dos valores de difusividade térmica adotados no estudo.

4.11 Discussão dos resultados obtidos nas otimizações

As indústrias de processamento de produtos alimentícios utilizam os processos de aquecimento e resfriamento como forma de garantir a preservação de determinados

tipos de alimentos (LINS, 2013). Entretanto, nesses processos, onde ocorre a retirada ou fornecimento de calor, parâmetros termofísicos do produto, como a difusividade térmica, condutividade térmica, dentre outros, precisam ser conhecidos para que tais processos sejam descritos, o tempo definido e a segurança alimentar garantida (TRES *et al.*, 2011; FARIAS *et al.,* 2012; ATAÍDE, 2014).

Na pasteurização, processo utilizado no presente trabalho, é de fundamental importância garantir que a temperatura correta seja alcançada em todos os pontos do produto, inativando ou destruindo os micro-organismos patogênicos. Este processo envolve o aquecimento, que ocorre em regime transiente, o período de equilíbrio, com a temperatura constante, que acontece em regime permanente e o resfriamento rápido que ocorre em regime transiente. É o período de equilíbrio térmico, mantido por determinado tempo, quem garante que todos os pontos do produto atingiram a temperatura de inativação de micro-organismos.

Os parâmetros termofísicos, podem ser utilizados em simulações da cinética de penetração do calor em todo o produto, inclusive nos pontos mais desfavoráveis, e assim, determinar o tempo necessário para inativar tais agentes.

Um dos parâmetros mais importantes em processos de transferência ou remoção de calor é a difusividade térmica. Fisicamente, representa a capacidade de um produto conduzir calor com a capacidade de armazená-lo (BETTA *et al*., 2009). Ela indica a velocidade com que o calor se propaga através da substância, permitindo conhecer como alguns parâmetros físico-químicos são alterados. É influenciada pelo conteúdo de água, pela porosidade e pela temperatura (OLIVEIRA, 2014; SOUZA *et al.*, 2015).

Na literatura podem ser encontrados alguns trabalhos que relacionam a variação da difusividade térmica como consequência da variação da temperatura e da umidade durante os processos. É importante ressaltar que a difusividade térmica pode variar de um local para outro dentro de um mesmo produto, caso ele não seja homogêneo.

Os trabalhos de Tres *et al.*, (2011); Ataíde (2014); Costa (2015); Araújo (2018) e Silva *et al*. (2018b), são alguns desses estudos que enfatizam a variação da difusividade térmica em função da variação da temperatura do produto, durante o processamento. Entretanto, também é possível encontrar na literatura resultados que expressam o valor constante da difusividade térmica aparente dos produtos analisados (CARCIOFI *et al*., 2002; CARBONERA *et al*., 2003; PLAZL *et al*., 2006; BAÏRI *et al*., 2007; HUANG, 2007; BETTA *et al*., 2009), dentre outros.

Na presente pesquisa, o valor determinado para a difusividade térmica para condição de contorno variável do primeiro tipo referente a função constante foi $\alpha(T) = 1.2147 \times 10^{-7}\ m^2s^{-1}$ e valor da média da difusividade térmica variável com a temperatura local foi $\alpha\,(T) = 1{,}5583 \times 10^{-7}\ m^2s^{-1}$. A difusividade térmica em função da temperatura, para a polpa da graviola, obtida pela otimização, é dada pela expressão $\alpha\,(T) = 1{,}4555 \times 10^{-7}\cosh(7{,}9774 \times 10^{-3}T)$. A média dos valores das difusividades obtidas para o modelo mais simples (difusividade constante e contorno constante) e modelo mais complexo (difusividade variável e contorno variável) foi de $\alpha_{médio} = 1{,}386 \times 10^{-7}\ m^2s^{-1}$.

Na literatura, é vasta a existência de pesquisadores que usaram métodos diferentes com o objetivo de determinar a difusividade térmica de polpas de frutas, e que concluíram em suas pesquisas a variação da difusividade com a temperatura local. Alguns desses trabalhos são apresentados a seguir e pode-se observar que os resultados encontrados não diferem de maneira significativa dos valores obtidos neste trabalho.

Simões e Murr (2000) estudaram a difusividade térmica da polpa de manga analisando diferentes formas de processamento: polpa integral, centrifugada e peneirada. Eles verificaram que os valores de difusividade térmica variaram entre 1,38 x 10^{-7} e 1,41 x 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$, sendo aproximadamente 1,41 x 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ para a polpa integral, 1,40 x 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ para a polpa centrifugada e 1,38 x 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ para a polpa peneirada. Os autores observaram que a presença de sólidos insolúveis praticamente não alterou a difusividade térmica, pois os valores encontrados foram muito próximos entre si. Eles também constataram que o aumento da concentração de sólidos solúveis provocou uma pequena diminuição da difusividade térmica, chegando a 1,28 x 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ na polpa concentrada. Além disso, verificaram que os modelos matemáticos avaliados representaram adequadamente o comportamento térmico da polpa de manga, apresentando boa concordância com os resultados experimentais. Os autores concluíram que o tipo de processamento da polpa exerce pouca influência na difusividade térmica, enquanto a concentração de sólidos solúveis apresenta maior efeito sobre essa propriedade. Destacaram ainda que a consideração da temperatura pode contribuir para o desenvolvimento de modelos mais precisos na análise da transferência de calor em polpas de frutas.

Silva, M. *et al*. (2010), aplicou o método Flash para determinar as propriedades termofísicas (difusividade térmica e condutividade térmica) da polpa de acerola. De

acordo com eles, difusividade térmica foi determinada em um aparelho micro-flash, modelo LFA 457 da Netzch e a condutividade térmica foi calculada no próprio equipamento Flash a partir do conhecimento das outras propriedades termofisicas. Os valores encontrados para a difusividade térmica em função da temperatura variaram de 1,88 x 10^{-7} m^2s^{-1} a 2,14 x 10^{-7} m^2s^{-1}. Ainda segundo os autores, esses valores estão próximos dos valores encontrados na literatura para diversas polpas de frutas, que estão na faixa de 1 x 10^{-7} m $^2s^{-1}$ a 2 x 10^{-7} m^2 s^{-1}. Eles também afirmaram que a difusividade térmica aumentou com a temperatura local, o que segundo eles, está de acordo com o trabalho de Souza (2008), que determinou a difusividade térmica variável da polpa de framboesa, amora, mirtilo e morango.

Silva *et al.* (2011) estudaram a difusividade térmica de alimentos enlatados durante a pasteurização, analisando o aquecimento do purê de tomate e do creme de baunilha por meio da comparação entre temperaturas experimentais e simulações numéricas obtidas pelo método dos volumes finitos. Inicialmente, os autores consideraram a difusividade térmica constante, obtendo para o purê de tomate o valor de 1,48 × 10^{-7} m^2 s^{-1} e coeficiente de determinação R^2 = 0,999590. Entretanto, verificaram correlação dos erros com a temperatura (r = 0,7037), indicando limitações do modelo. Ao considerar a difusividade térmica variável com a temperatura, observaram melhora significativa nos resultados, com redução do qui-quadrado em cerca de 14 vezes e aumento do coeficiente de determinação para R^2 = 0,999948. Para o purê de tomate, a difusividade variou entre 1,29 × 10^{-7} e 1,57 × 10^{-7} m^2 s^{-1}. Já para o creme de baunilha, os autores obtiveram difusividade constante de 1,38 × 10^{-7} m^2 s^{-1}, com R^2 = 0,999933, e melhor ajuste no modelo variável, alcançando R^2 = 0,999954. Como conclusão, verificaram que modelos com difusividade térmica dependente da temperatura descrevem de forma mais precisa a cinética de aquecimento durante a pasteurização.

Lins (2013) determinou parâmetros termofisicos em corpos com geometria cilíndrica, trabalhando com pasteurização de agar gel, creme custard e purê de tomate. A expressão encontrada por ele para a difusividade térmica, $\alpha(T) = b\exp\left(aT^{\frac{1}{2}}\right)$ difere da encontrada neste trabalho. É possível que isto tenha acontecido por que ele trabalhou com polpas diferentes, que neste trabalho foi a polpa de manga. Ele afirmou, que de acordo com os resultados obtidos, a melhor expressão para a difusividade térmica aparente é crescente com a temperatura local.

Silva *et al.* (2014) investigaram o processo de aquecimento e pasteurização da polpa de coco verde, com o objetivo de determinar a difusividade térmica considerando sua dependência com a temperatura local do produto. Os autores desenvolveram uma modelagem numérica baseada na equação de condução de calor e verificaram que assumir difusividade térmica constante pode gerar erros durante o regime transiente, devido aos gradientes térmicos existentes entre a superfície e o centro do alimento. A função hiperbólica cosseno foi a que apresentou melhor ajuste para representar a difusividade térmica em função da temperatura. Os resultados mostraram que a difusividade térmica aumentou com a temperatura, apresentando valores da ordem de 10^{-7} m^2 s^{-1}. A simulação térmica permitiu acompanhar o aquecimento do centro do produto e definir o tempo ideal de processamento. Além disso, os autores observaram que a pasteurização não alterou significativamente as características físico-químicas da polpa, mas promoveu expressiva redução microbiológica, comprovando a eficiência do tratamento térmico. Dessa forma, concluíram que o uso da difusividade térmica dependente da temperatura melhora a previsão do aquecimento e auxilia na determinação do tempo de processamento por meio de simulação numérica.

Silva *et al*. (2014) desenvolveram um algoritmo modificado de remoção ótima de pontos experimentais (OREP) para determinar a difusividade térmica aparente (α) de produtos enlatados sob condição de contorno de Dirichlet (primeiro tipo), e eles validaram esse método com dados simulados numericamente em um cilindro de raio 0,2 m com $\alpha = 1{,}50 \times 10^{-7}$ m^2/s, aplicando-o também ao aquecimento de gel de Agar (R = 13 mm, variando de 20,1°C para 24,9°C). Eles projetaram o método para eliminar a subjetividade na escolha de pontos iniciais através da minimização do qui-quadrado, e eles conseguiram reduzir o erro de 21,2% (método tradicional) para apenas 0,17% na validação com termopar no centro (r/R = 0,0), alcançando precisão de 0,02% e $r^2 = 0{,}9999989$. Na aplicação experimental, eles obtiveram $\alpha = (1{,}4357 \pm 0{,}0054) \times 10^{-7}$ m^2/s com precisão de 0,38% e acurácia de 0,6% quando comparado com dados da literatura, e eles demonstraram que a posição do termopar próxima ao centro ($r/R \leq 0{,}5$) é crucial para resultados confiáveis, mostrando que o algoritmo deles rivaliza em eficiência com métodos numéricos complexos como o de Levenberg-Marquardt.

Silva *et al*. (2014) estudaram a determinação da difusividade térmica em processos de condução transiente de calor, propondo uma modificação da abordagem OREP para reduzir erros no ajuste de dados experimentais de temperatura. Os autores

analisaram a condução de calor com condição de contorno de Dirichlet e verificaram que o uso de todo o conjunto experimental poderia gerar erros de até 21,2%. Para minimizar esse problema, desenvolveram um algoritmo baseado na remoção ótima de pontos experimentais, obtida pela minimização do qui-quadrado das simulações. Os resultados mostraram que a remoção de aproximadamente 15 a 17 pontos experimentais permitiu estimar a difusividade térmica com alta precisão, obtendo valores próximos de $1{,}50 \times 10^{-7}$ m² s⁻¹ na validação e $1{,}4357 \times 10^{-7}$ m² s⁻¹ para o gel de ágar, com nível de confiança de 95,4%. A abordagem OREP modificada reduziu o erro para cerca de 0,17% e apresentou maior exatidão quando o termopar foi posicionado no centro do cilindro. Como conclusão, os autores verificaram que o método elimina a subjetividade na seleção dos dados experimentais e melhora significativamente a estimativa da difusividade térmica em processos dominados pela condução de calor.

Costa (2015) trabalhou com a pasteurização polpa de jaca. Ele utilizou dois recipientes cilíndricos de diâmetros diferentes os quais ele denominou de C1, com diâmetro 35,92 mm e comprimento de 32,23 mm e C2, com diâmetro de 49,96 mm e comprimento de 57,68 mm. De acordo com ele, estes experimentos tinham o objetivo de encontrar a melhor expressão, por otimização, para a difusividade térmica. Como resultado da pesquisa, ele afirmou que a melhor função para expressar a difusividade térmica variável com a temperatura local foi $\alpha(T) = 2{,}959766 \times 10^{-3}\, T + 1{,}337118 \times 10^{-7}$. Ele afirmou ainda que, durante o aquecimento, a difusividade térmica aparente da polpa de jaca é crescente com a temperatura local.

Batista *et al.* (2016) utilizaram o método gráfico de Heisler na determinação da condutividade e difusividade térmica em alimentos cuja geometria se aproximava de cilindros. Eles trabalharam com cenoura e pepino, que foram imersos em água a 100 °C por vinte minutos. De acordo com eles, o diâmetro da amostra de cenoura foi de 37,04 mm e da amostra de pepino de 36,25 mm. Ainda de acordo com os autores, depois de decorridos 20 minutos da imersão, os produtos foram retirados da água e o processo de aferição das temperaturas no centro e na superfície foi iniciado com auxílio de termopares, considerando a primeira medida como o tempo zero. Após o tempo inicial, as temperaturas dos produtos foram aferidas de 5 em 5 minutos até atingir o tempo estabelecido de 20 minutos. Os valores encontrados por eles para a difusividade térmica da cenoura foi de $1{,}580 \times 10^{-7}$ m^2 s^{-1} e para a difusividade térmica do pepino foi $1{,}615 \times 10^{-7}$ m^2 s^{-1}. Eles concluíram o trabalho afirmando que método

de Heisler mostrou-se eficiente, apresentando valores satisfatórios obtidos de forma mais simplificada quando comparada a outros métodos de determinação das propriedades termofísicas de alimentos.

Ataíde (2018), trabalhando com pasteurização de polpa de mamão e polpa de caju, quando considerou constante a difusividade térmica aparente encontrou o valor de $\alpha = 1{,}37 \times 10^{-7}\ m^2 s^{-1}$ para o mamão e $\alpha = 1{,}36 \times 10^{-7}\ m^2 s^{-1}$ para o caju. Esses valores mostram bastante coerência com os valores obtidos no presente estudo. No caso da difusividade térmica em função da temperatura local, as expressões encontradas por ele também apresentaram boa semelhança com a da presente pesquisa, para esta situação ele encontrou, $\alpha(T) = 1{,}243 \times 10^{-7} \times \cosh(1{,}756 \times 10^{-4} \times T^2)$ para o mamão e $\alpha(T) = 1{,}201 \times 10^{-7} \times \cosh(11{,}979 \times 10^{-4} \times T^2)$ para o caju. De acordo com ele, os resultados do trabalho foram coerentes com valores encontrados na literatura.

Ghatrehsamani *et al.* (2018) estudaram a determinação da difusividade térmica de trigo e milho, bem como sua comparação pelo método de Dickerson. Eles investigaram os processos de aquecimento e resfriamento em produtos agrícolas, destacando que a difusão térmica ocorre durante essas etapas, envolvendo a acumulação ou perda de calor no interior do material, o que resulta em variações na distribuição de temperatura ao longo do tempo. Nesse contexto, o calor penetra e se dissipa através do corpo ou das diferentes camadas porosas dos produtos agrícolas a uma taxa diretamente relacionada à sua difusividade térmica. Eles realizaram medições experimentais das difusividades térmicas do trigo (variedade Sabalan, massa de 427,7 g e umidade de 9% b.s.) e do milho (variedade Crossing 704, massa de 362,1 g e umidade de 8,07% b.s.), em quatro diferentes níveis de temperatura. Os resultados indicaram que a difusividade térmica aumenta com o incremento da temperatura da superfície externa do cilindro. Os resultados indicaram que a difusividade térmica aumenta com o incremento da temperatura da superfície externa do cilindro.Os valores mínimos e máximos de difusividade térmica obtidos foram, respectivamente, da ordem de $1{,}268 \times 10^{-3}$ a $2{,}924 \times 10^{-5}$ m²/s para o trigo e de $0{,}862 \times 10^{-3}$ a $3{,}135 \times 10^{-5}$ m²/s para o milho. Os autores observaram que a variação da difusividade térmica foi mais significativa no trigo do que no milho, atribuída às diferenças na resposta térmica à variação da temperatura na superfície externa.

Fernandes *et al.* (2019) investigaram a estimativa da difusividade térmica do requeijão cremoso tradicional durante o processo de resfriamento, destacando a

importância desse parâmetro para o projeto de equipamentos térmicos e conservação do produto. Os autores desenvolveram um sistema experimental de transferência de calor com retirada radial unidimensional por condução em regime transiente, utilizando três sensores de temperatura posicionados em diferentes distâncias radiais (r_1 = 0,0 cm; r_2 = 2,8 cm; r_3 = 5,8 cm). A partir das curvas de temperatura em função do tempo, ajustadas computacionalmente no software Maple, estimaram a difusividade térmica média do requeijão em 3,81 × 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$. Os resultados apresentaram concordância com o modelo teórico e mostraram que a difusividade térmica do requeijão é superior à de queijos como o cheddar, cuja faixa varia entre 1,07 × 10^{-7} e 1,536 × 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$, comportamento atribuído à menor quantidade de água presente no produto.

Jahanbakhshian e Hamdami (2021) estudaram o processo de pasteurização de azeitonas verdes em conserva, com o objetivo de analisar como o calor se distribui dentro da embalagem durante o aquecimento e o resfriamento do produto em salmoura ácida a 6%. O estudo foi desenvolvido por meio de simulação numérica (CFD) e validação experimental, utilizando um modelo bidimensional baseado nas equações de conservação de massa, momento e energia, resolvidas pelo Método dos Elementos Finitos, considerando variações das propriedades térmicas com a temperatura. Os resultados mostraram boa concordância entre o modelo e os dados experimentais (r^2 = 0,9933), indicando que o método foi confiável para representar o processo real. Eles observaram a formação de correntes de convecção natural dentro da lata, o que fez com que a região de aquecimento mais lento (SHZ) se deslocasse para a parte inferior do recipiente, entre 10% e 15% da altura a partir do fundo, além de uma velocidade média do fluido de 0,00192 m/s que diminuiu ao longo do tempo devido à redução do gradiente de temperatura. Eles também verificaram que a convecção natural acelera a transferência de calor em comparação com a condução pura, influenciando diretamente o tempo de processamento térmico, que atingiu a letalidade necessária para microrganismos resistentes em cerca de 600 s, evitando excesso de aquecimento. Eles concluíram que considerar a convecção natural no modelo torna a previsão do processo mais precisa, permitindo otimizar o tempo de pasteurização e preservar melhor a qualidade das azeitonas.

Costa *et al.* (2022) estudaram a pasteurização contínua da polpa de açaí em trocador de calor de placas, utilizando simulações CFD associadas a dados experimentais para avaliar o desempenho térmico e a inativação das enzimas

peroxidase (POD) e polifenol oxidase (PPO). Os autores analisaram diferentes configurações de fluxo (série e série-paralelo) e vazões, verificando que o arranjo em série (10x1/10x1) apresentou melhor eficiência térmica, com maior uniformidade de temperatura, desvios inferiores a 2,4 °C e diferenças de carga térmica abaixo de 8%. Já o arranjo série-paralelo (5x2/5x2) apresentou maiores desvios, superiores a 6 °C, associados à formação de zonas de estagnação e menor eficiência de escoamento. A inativação enzimática foi mais eficiente na seção de aquecimento, especialmente para a PPO, mais sensível ao calor que a POD. Os autores observaram ainda divergências entre resultados experimentais e numéricos na atividade residual enzimática, atribuídas a incertezas experimentais e limitações do modelo CFD. Concluíram que a CFD é eficiente para análise e otimização do processo, embora apresente limitações na previsão precisa da inativação enzimática em sistemas complexos

Argo *et al.* (2024) investigaram o efeito da temperatura e do tempo de pasteurização nas propriedades físicobioquímicas do suco de graviola (Annona muricata L.), avaliando TSS, viscosidade, pH, cor, atividade da polifenol oxidase (PPO), compostos fenólicos, flavonoides, atividade antioxidante e carga microbiana. Os autores observaram que o aumento da severidade térmica elevou o TSS de 12 para 13,73 °Brix, a viscosidade de 351 para 928,67 mPa e o pH de 4,18 para 4,40. Verificaram também redução significativa da PPO, com até 93% de inativação a 80 °C por 15 min. A atividade antioxidante atingiu valor máximo de 76,91% a 62 °C por 5 min, associado aos maiores teores de fenólicos (85,45 mg GAE/100 g) e flavonoides (71,38 mg QE/100 g), enquanto temperaturas mais elevadas promoveram sua redução por degradação térmica. A carga microbiana foi reduzida ao mínimo de 54 CFU/mL a 80 °C por 15 min. Concluíram que a pasteurização melhora a segurança microbiológica e a inativação enzimática, mas pode reduzir compostos bioativos em condições mais severas.

Alhusni e Krishnan (2025) estudaram a transferência de calor durante a pasteurização de suco de uva em embalagens enlatadas de diferentes volumes (330, 500 e 1000 mL), por meio de simulações CFD em regime transiente. Os autores analisaram os coeficientes convectivos de transferência de calor nas superfícies interna e externa dos recipientes, verificando que a embalagem de 500 mL apresentou melhor desempenho térmico, com maior coeficiente convectivo médio e equilíbrio entre rapidez de aquecimento e massa térmica. O recipiente de 330 mL apresentou aquecimento mais rápido, enquanto o de 1000 mL apresentou maior resistência térmica

e maior tempo de aquecimento devido à maior massa e formação de zonas frias. Foi observado ainda comportamento aproximadamente simétrico entre aquecimento e resfriamento, com coeficientes convectivos semelhantes nas faixas de 60 a 80 °C. Os autores verificaram que o uso de banho-maria aumentou o tempo de aquecimento em cerca de 8 a 10 minutos em comparação com simulações sem banho ou com coeficiente de contorno fixo, evidenciando a influência das condições convectivas dinâmicas no processo. Embora não tenham estimado diretamente a difusividade térmica, o transporte de calor foi governado pelas propriedades termofísicas do fluido (k, ρ e Cp), que influenciam o comportamento difusivo do produto durante a pasteurização.

A Tabela 4.15 mostra os valores de difusividade térmica de algumas frutas, os pesquisadores e o ano da publicação do trabalho.

Tabela 4.15: Difusividade térmica de algumas frutas.

Fruta	**Pesquisador**	**Difusividade térmica α (x 10^{-7} m^2 s^{-1})**
Banana	Singh e Heldman (1993)	1,42
Limão	Singh e Heldman (1993)	1,07
Manga	Simões (2000)	1,28 a 1,41
Cajá	Silva *et al.* (2002)	2,29 a 1,39
Umbu	Lima *et al*. (2003)	1,35 a 1,52
Figo	Sarria e Honório (2004)	1,56
Cupuaçu	Araújo *et al*. (2004)	1,31
Mamão papaya	Kurozawa *et al.* (2008)	1,03 a 1,18
Amora	Souza (2008)	1,41 a 1,52
Morango	Souza (2008)	1,45 a 1,62
Caju	Ataíde (2014)	1,36
Jaca	Costa (2015)	1,46
Mamão	Ataíde (2018)	1,37

Fonte: Autoria própria.

5 CAPÍTULO: CONCLUSÕES

5.1 Considerações iniciais

No capítulo anterior, foram apresentados e explicados os resultados obtidos ao longo da pesquisa, com uma análise detalhada dos dados e das observações realizadas. Neste capítulo, destaca-se as principais explicações do estudo, com o objetivo de sintetizar as contribuições mais relevantes e evidenciar as implicações práticas dos resultados. Além disso, são propostas possíveis sugestões para pesquisas futuras.

5.2 Conclusões

Diante dos resultados obtidos nas simulações dos dados experimentais das pasteurizações realizadas com a polpa da graviola, é possível apresentar algumas conclusões que serão enumeradas a seguir:

- A solução numérica da equação de difusão em coordenadas cilíndricas bidimensionais apresentou resultados consistentes e coerentes, com valores disponíveis na literatura.
- O código computacional desenvolvido e utilizado para simular o processo de difusão de calor em processos de pasteurização, bem como determinar parâmetros termofísicos, forneceu resultados condizentes com a literatura pertinente.
- Várias funções crescentes foram utilizadas para expressar a difusividade térmica como uma função da temperatura local de polpa de frutas. Em todas as otimizações realizadas, a expressão que apresentou os melhores indicadores estatísticos (χ^2, R^2) e que melhor representou a difusividade térmica aparente variável com a temperatura local é expressa por $F4 = \alpha(T) = b\cosh(aT)$.
- O *software* LabFit foi utilizado para determinar uma função que descrevesse os dados do contorno e a melhor função obtida foi a Equação 4.1.
- Estimou-se, como resultado da presente pesquisa, que a melhor função para representar a difusividade térmica variável da polpa de graviola, é crescente com a temperatura local, e representada pela função:

$$F4 = \alpha = 1{,}4555 \times 10^{-7}\cosh(7{,}9774 \times 10^{-3}T).$$

- Os dois modelos propostos: (1) Difusividade variável e temperatura no contorno constante e (2) difusividade variável e temperatura no contorno variável, apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais. No entanto,o modelo (2) é o mais adequado do ponto de vista físico, por se tratar de um recipiente de vidro.
- Os valores de difusividade térmica obtidos para a polpa de graviola apresentam a mesma ordem de grandeza observada em outras polpas de frutas com alto teor de água, como mamão, caju e morango. Observa-se que os resultados estão de acordo com aqueles encontrados na literatura, indicando coerência com pasteurização lenta e comportamento térmico esperado para esse tipo de material. Dessa forma, conclui-se que a difusividade térmica determinada é compatível com as características da polpa analisada, confirmando a adequação do método utilizado no estudo.
- A média das difusividades obtidas nos dois modelos apresentou uma boa concordância com a difusividade obtida pela equação de Riedel, com uma discrepância de 0,43%.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicar a metodologia apresentada nesta pesquisa para polpas de outros produtos pastosos;
- Estudar a viabilidade da aplicação da metodologia utilizada nesta pesquisa para produtos alimentícios em estado líquido;
- Aplicar a metodologia apresentada nesta pesquisa para produtos acondicionados em recipientes confeccionados em recipientes com uma condutividade termica menor;
- Estudar a viabilidade de se aplicar a metodologia proposta no presente trabalho, utilizando outras formas de energia, como por exemplo, micro-ondas e laser, como fonte de aquecimento do meio externo;
- Estudar o calculo das incertezas dos parâmetros obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIA - Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. Indústria de alimentos: ciência, saúde e segurança na mesa dos brasileiros. São Paulo: ABIA, 2025.

ABRAFRUTAS. Painéis de produção Disponível em: https://abrafrutas.org/paineis-de-producao/. Acesso em: 16 jun. 2025.

ADAB – Agência de Defesa Agropecuária da Bahia. 2017.

ADAMS, M. R.; MOSS, M. O. Food Microbiology. 3rd ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, p. 463, 2008.

ADEBAYO, F. O.; OBIEKEZIE, S. O. Microorganisms in waste management. Research Journal of Science and Technology, v. 10, 2018.

AIRES, K. L. C. A.; SILVA, W. P.; AIRES, J. E. F.; JUNIOR, A. F. S.; SILVA, C. M. D. P. S. Convective drying of osmotically dehydrated apples described by three-dimensional numerical solution of the diffusion equation with analysis of water effective diffusivity spatial distribution. Drying Technology, 2019.

AL-HOLY, M., RASCO, B., & ZIVANOVIC, S.; Effect of pasteurization on quality and safety of fruit pulps. Food Control, 125, 107972, 2021.

ALHUSNI, H. A.; KRISHNAN, S. Time-dependent heat transfer coefficients of standard cans during pasteurization. ACS Omega, v. 10, n. 37, p. 43252–43263, 2025.

ALMEIDA, L. S.; BRITO, F. I.; MARTINS, B. Operador de processamento de frutas e hortaliças. Natal (RN): Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2022. Livro 4, p. 12. ISBN: 978-65-84831-19-3.

ALMEIDA, M.; SANTOS, E.; PEREIRA, M. Produção e caracterização de microrganismos eficientes: uma alternativa sustentável. Cadernos de Agroecologia, v. 20, n. 1, 2025.

ANESE, R. O.; FONSECA, D. Fisiologia pós-colheita em fruticultura. Santa Maria: UFSM; Colégio Politécnico; Rede e-Tec, 2015. 130 p. ISBN: 978-85-63573-89-6.
ANVISA. Consulta Pública nº 257, de 28 de setembro de 2016. Diário Oficial da União, 2016.

AOAC – Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis. 20. ed. Washington, 2016.

ARAÚJO, L. F.; FARIAS, V. S. O.; AMARAL, S. L. D.; ATAÍDE, J. S. P.; SILVA, W. P.; OLIVEIRA, M. E. G. Influência da imposição de uma difusividade térmica variável durante a pasteurização de polpas de frutas. In: II Encontro Nacional da Agroindústria. Bananeiras: UFPB, 2016.

ARGO, B. D.; ISLAMI, R. C.; KHOIR, N. H. Effect of pasteurization time and temperature on the physico-biochemical properties of soursop (Annona muricata L.) juice. Advances in Food Science, Sustainable Agriculture and Agroindustrial Engineering, v. 7, n. 2, p. 183–193, 2024.

ARIAS, J. L. O. Determinação de conservantes em alimentos processados empregando QuEChERS, Sillme e HPLC-UV: estudo de métodos e estimativa da ingestão diária. 2019.

ASARE, G. A.; AFRIYIE, D.; NGALA, R. A.; ABUTIATE, H.; DOKU, D.; MAHMOOD, S. A.; RAHMAN, H. Antiproliferative activity of aqueous leaf extract of Annona muricata L. on the prostate BPH-1 cells and some target genes. Integrative Cancer Therapies, v. 14, p. 65–74, 2015.

ASSIS, L. M. *et al*. Revisão: características de nanopartículas e potenciais aplicações em alimentos. Revista Brasileira de Tecnologia de Alimentos, v. 15, p. 99–109, 2012.

ATAÍDE J. S. P.; DA SILVA W. P.; DE OLIVEIRA MEG, E SILVA C. M. D. P. S.; NUNES J. S.; Heat transfer during pasteurization of fruit pulps stored in containers with arbitrary geometries obtained through revolution of flat. Journal of food engineering.: p 58-67. v 217. 2018.

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, Campina Grande, 2014.

ATAIDE, J. S. P.; FARIAS, V. S. O.; SILVA, W. P.; COSTA, W. S. Transferência de calor durante o processo de pasteurização na polpa da graviola armazenada em recipientes de forma cilíndrica. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

ATAÍDE, J. S. P.; SILVA, W. P. Transferência de calor na pasteurização de polpas de frutas. São Paulo: Novas Edições Acadêmicas, 2018. 300 p.

AZIZI-LALABADI, M.; MOGHADDAM, N. R.; JAFARI, S. M. Pasteurization in the food industry. In: JAFARI, S. M. (ed.). Thermal Processing of Food Products by Steam and Hot Water. Cambridge: Woodhead Publishing, 2023. p. 247–273.

BAGHABRISHAMI, R. G.; GOLI, S. A. H. Tomato seed oil-enriched tomato juice: effect of oil addition type and heat treatment on lycopene bioaccessibility and oxidative stability. Food Chemistry, v. 402, p. 134217, 2023.

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D.; COSTA, C. F. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – Agriambi, v. 19, n. 12, 2015.

BARBEDO, L. S., "A Micologia Geral como base para suas diferentes áeras." estudos Multidisciplinares em Microbiologia: teoria e prática-volume 2. Vol. 2. Editora Científica Digital, 2025.

BARBOSA, A. Microrganismos Associados às doenças Transmitidas por Alimentos (DTA’s) e Impactos da saúde do manipulador de alimentos: revisão de literatura. Revista Saúde em Foco, edição n. 11, 2019.

BARNETT, S. M.; SABLANI, S. S.; TANG, J.; ROSS, C. F. The potential for microwave technology and the ideal profile method to aid in salt reduction. Journal of Food Science, v. 85, n. 3, p. 600–610, 2020.

BARROS, D. M; SILVA, A. P. F.; MOURA, D. F.; MEDEIROS, S. M. F. R. S. Principais Técnicas de Conservação dos Alimentos. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 806-821, jan. 2020.

BARROS, E. C. M.; COSTA, G. N. S.; RIBEIRO, L. O.; MENDES, M. F.; PEREIRA, C. S. S. Effects of pasteurization on the physicochemical, microbiological and anthocyanins from juçaí pulp (Euterpe edulis Martius). Revista Teccen, v. 8, n. 1, p. 21–26, 2015.

BATISTA, J.N.M.; SILVA, V.B.; LIMA, A.C.A.; LEITE, L.I.S.; OLIVEIRA, A.B. Determinação da condutividade térmica de legumes utilizando o método gráfico de Heisler. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza/CE, 2016.. Anais eletrônicos..., Galoá, 2016. Disponível em: <https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/determinacao-da-condutividade-termica-de-frutas-e-legumes-utilizando-o-metodo-gr?lang=pt-br>. Acesso em: 26 Abr. 2026.

BENZIE, I. F. F.; STRAIN, J. J. Ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: the FRAP assay. Analytical Biochemistry, v. 239, p. 70–76, 1996.

BERALDO, R. A.; FERRARI, L. S. O. Culinary workshops as food and nutrition education strategies for health promotion and disease prevention in the population. Revista Foco, v. 16, n. 5, e1886, 2023.

BERMUDEZ-AGUIRRE, D.; NIEMIRA, B. A. Pasteurization of foods with ultrasound: the present and the future. Applied Sciences, v. 12, n. 20, p. 10416, 2022.

BETTA, G.; RINALDI, M.; BARBANTI, D.; MASSINI, R. A quick method for termal diffusivity estimation: Application to several foods. Journal of food engineering, v. 91, n. 1, p. 34 – 41, 2009.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 912 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Instrução Normativa nº 1, de 7 de janeiro de 2000. Aprova o Regulamento Técnico Geral para fixação dos padrões de identidade e qualidade para polpa de fruta. Diário Oficial da União, Brasília, 10 jan. 2000. Seção 1, p. 54.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Banco de leite humano: funcionamento, prevenção e controle de riscos. Brasília: Anvisa, 2008.

BRASIL. Ministérios da Marinha de Guerra, do Exército e da Aeronáutica Militar. Decreto-Lei nº 986, de 21 de outubro de 1969. Institui normas básicas sobre alimentos. Diário Oficial da União, Brasília, 21 out. 1969. Retificação em 11 nov. 1969. Alterado pela Lei nº 9.782, de 26 jan. 1999, e pela Medida Provisória nº 2.190-34, de 23 ago. 2001.

BHAT, R., JAGTAP, S., & SINGH, S.; Thermal inactivation of microorganisms in fruit pulps: Safety and quality perspectives. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 17(2), 401–418, 2018.

CANEDO, E. L. Fenômenos de transportes. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

CAPARROS-LEFEBVRE, D.; ELBAZ, A. Possible relation of atypical parkinsonism in the French West Indies with consumption of tropical plants: a case-control study. The Lancet, v. 354, n. 9175, p. 281–286, 1999.

CARBONERA, L.; CARCIOFI, B. M.; HUBER, E.; LAURINDO, J. B. Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. Brazilian Journal of food Technology, v. 6, n. 2, p. 285 – 290, 2003.

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, n. 1, p. 89–94, 2002.

CARDOSO, S.; RUBENSAM, J. M. Elaboração e avaliação de projetos para agroindústrias. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011. (Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS).
CARVALHO, I. T. Microbiologia dos alimentos. Recife: Editora UFRPE, 2010.

CARVALHO, L. C. L.; CLEMENTINO, V. D. R.; GOMES, E. C. S.; FARIAS, M. S. R. Transformação digital na fruticultura: uma revisão sistemática na base Web of Science no período 2010–2021. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 62, n. 4, e270355, 2024.

CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.

CEBRIÁN, G., CONDÓN, S., & MAÑAS, P.; Fisiologia da Inativação de Bactérias Vegetativas por Tratamentos Térmicos: Modo de Ação, Influência dos Fatores Ambientais e Cinética da Inativação" Foods 6, nº 12: 107, 2017.

CHEMICAL RISK. Segurança na indústria alimentícia: a importância das boas práticas de fabricação. São Paulo, 2024.

CHILANTI, G.; FACCO, E. M. P.; ANDREIS, K. E. dos P.; NOVELLO, J. C. de L. Pêssego pasteurizado: uma estratégia para aumentar a durabilidade desta matéria-prima no banco de alimentos de Caxias do Sul – RS. RBONE – Revista Brasileira de Obesidade, Nutrição e Emagrecimento, v. 18, n. 112, p. 52–61, 2024.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim hortigranjeiro. Brasília, DF, v. 9, n. 6, jun. 2023.

CORRALES, M., TOEPFL, S., BUTZ, P., KNORR, D., & TAUSCHER, B.; Influence of different processing technologies on antioxidant capacity of fruit juices. Food Chemistry, 108(3), 1028–1036, 2008.

CORIA-TÉLLEZ, A. V.; MONTALVO-GONZÁLEZ, E.; YAHIA, E. M.; OBLEDO-VÁZQUEZ, E. N. Annona muricata: a comprehensive review on its traditional medicinal uses, phytochemicals, pharmacological activities, mechanisms of action and toxicity. Arabian Journal of Chemistry, v. 11, n. 5, p. 662–691, 2018.

COSTA, H. C. B.; CAVALCANTE, T. A. B. B.; GUT, J. A. W.; SILVA, D. O., VIEIRA, L. G. M. An experimental and numerical evaluation of continuous pasteurization of açai pulp with plate heat exchangers on the inactivation of peroxidase and polyphenol oxidase, Journal of Food Engineering, Volume 314, article 110799, 2022.

COSTA, W. S. da. 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, 2015.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.

CRISTIANINI, M.; CRUZ, A. D.; PRUDÊNCIO, E. S.; ESMERINO, E. A.; RODRIGUES, S.; PIMENTEL, T. C. Tecnologias emergentes no processamento de alimentos. 2023.

DA SILVA, W. P., DE MEDEIROS, M. S., GOMES, J. P., & E SILVA, C. M. D. P. S. Improvement of methodology for determining local thermal diffusivity and heating time of green coconut pulp during its pasteurization. Journal of Food Engineering, v. 285, p. 110104, 2020.

DAMASCENO, L.; PFRIMER, R.T.; CARDOSO, C. F.; GEBARA, C. G. M. S.; NICOLAU, E. S.; Avaliação da temperatura de pasteurização da polpa de gabiroba (campomanesia xanthocarpa). v, 3. Cap, 8. P, 97-114, Nov. 2020.

DE SOUZA BARBOSA, L., MACEDO, J. L., DOS SANTOS, C. M., & MACHADO, A. V. Estudo da secagem de frutos tropicais do Nordeste. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 9, n. 1, p. 26, 2014.

DIAS, D. R. C.; BARROS, Z. M. P.; CARVALHO, C. B. O.; HONORATO, F. A.; GUERRA N. B.; AZOUBEL, P. M. Effect of sonication on soursop juice quality, LWT- Food Science and Technology, v. 62 p.883- 889, 2015.

DOMINGUES, R. DE Q., BRANDÃO, M. R. S., COUTO, L. A., DE SÁ, K. R., RAMOS, G. A., DE OLIVEIRA, E. D. H., COTRIM, J. A., & SANTOS, R. A. Análise

microbiológica da qualidade de mortadelas fatiadas comercializadas em supermercados no município de Guanambi/Bahia. Brazilian Journal of Development, Vol. 9 No. 4, 2023.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Graviola. Agência de Informação Tecnológica. Brasília, DF, 2021.

ERDAL, B.; AKALIN, R. B.; YILMAZ, B.; BOZGEYIK, E.; YIKMIŞ, S. Application of ultrasound to the organic cornelian cherry (*Cornus mas L.*) vinegar: Changes in antibacterial, antidiabetic, antihypertensive, and anticancer activities. J Food Process Preserv. Nov. 2022.

ETZBACH, L.; PFEIFFER, A. SCHIEBER, A.; WABER, F. Effects of thermal pasteurization and ultrasound treatment on the peroxidase activity, carotenoid composition, and physicochemical properties of goldenberry (*Physalis peruviana L.*) puree. LWT - Food Science and Technology 100, 69 – 74, 2019.

FARIAS, V. S. O. Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. 265 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil. 2011.

FARIAS, V. S. O.; ARAÚJO, F. L.; SILVA, W. P.; FRANCO, C. M. R.; ROCHA, C. M. R.; JÚNIOR, A. F. S. Drying study of ceramic tiles using three-dimensional analytical solution of the diffusion equation. Applied Mathematical Modelling, v. 15, n. 2, p. 409–432, maio 2018.

FARIAS, V. S. O.; SILVA, W. P.; CLEIDE, M. D. P. S.; DELGADO, J. M. P. Q.; NETO, S. R. F.; LIMA, A. G. B. Transient diffusion in arbitrary shape porous bodies: numerical analysis using boundary-fitted coordinates. Berlin; Heidelberg: Springer, v. 27, p. 85–119, 2012.

FARIAS, V. S. O.; SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; ROCHA, V. P. T.; LIMA, A. G. B. Drying of solids with irregular geometry: numerical study and application using a three-dimensional model. Heat and Mass Transfer, v. 49, n. 5, p. 695–709, 2013.

FARID, M.; GHANI, A. A. A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v. 43, n. 4, p. 523–531, 2004.

FERNANDES, J. S.; COSTA, O. S.; SALES, J. S.; VIEIRA, J. A. Estimativa da difusividade térmica do requeijão cremoso tradicional sob resfriamento. Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 12, n. 1, p. 1–13, jun. 2019.

FOLCH, J.; LESS, M.; SLOANE-STANLEY, G. H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. Journal of Biological Chemistry, v. 226, n. 1, p. 497–509, 1957.

FREITAS, A. L. G. E. Caracterização da produção e do mercado da graviola (*Annona muricata L.*) no estado da Bahia. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2012.

FREITAS, A. L. G. E.; VILASBOAS, F. S.; MOURA PIRES, M. de; SÃO JOSÉ, A. R. Caracterização da produção e do mercado da graviola (*Annona muricata L.*) no estado da Bahia. 2013.

FREITAS, A.; FIGUEIREDO, P. Conservação de alimentos. Lisboa, 2000.

FURTADO, A. A. L. Tratamento térmico. Brasília, DF: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2021.

GÁSPARO, R. R.; CASA GRANDE, D. J.. A importância de um sistema de gestão de segurança de alimentos em indústrias alimentícias e sua relação com a saúde pública. Revista Interface Tecnológica, Taquaritinga, SP, v. 21, n. 1, p. 929–940, 2025.

GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D.; RICHARDS, P. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. Journal of Food Engineering, v. 41, p. 55-64, 1999.

GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D.; RICHARDS, P. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. Journal of Food Engineering, v. 48, p. 147-156, 2001.

GHANI, A. G. A.; FARID, M.; A new computational technique for the estimation of GHATREHSAMANI, S.; AMPATZIDIS, Y.; SADEGHI, B.; GHATREHSAMANI, S. Measurement of thermal diffusivity of wheat and maize and comparison by Dickerson method. In: Asabe annual international meeting, 2018, St. Joseph, Michigan. Proceedings… St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, Paper Number: 1800160 , 2018.

GOMES, J. P. A.; SANTOS, A. F.; ALMEIDA, L. F. Uso de microrganismos eficientes como alternativa para agricultura sustentável: um referencial teórico. Agroecologia: Métodos e Técnicas para uma Agricultura Sustentável, v. 5, p. 340-355, 2021.

GOMES, D., RIBEIRO, H., & TEIXEIRA, P.; Thermal treatments and microbial safety in fruit-based products: A critical review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 59(8), 1089–1103, 2019.

GUILHERME, D. DE L.; ESTEVES, D.C. Doenças transmitidas por alimentos e água. Rev. Conexão Eletrônica – Três Lagoas, MS - Volume 14 – Número 1 – Ano 2017.

HOANG Q.B.; DUONG T. N. D.; HO T. T. L. Physicochemical, antioxidant and microbiological behavior of soursop purees during thermal treatment. Can Tho Univ J Sci. 2022; Vol. 14(1), No. 1: P.81-90 14(1), 2022.

HOLMAN, J. P. Transferência de Calor, McGraw-Hill, Inc. New York, NY, 1983.

HUANG, L. Computer simulation of heat transfer during in-package pasteurization of beef frankfurters by hot water immersion. Journal of Food Engineering, v. 80, p. 839-849, 2007.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -. Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017–2018: análise do consumo alimentar pessoal no Brasil. Rio de Janeiro, 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropecuário 2023.

INCROPERA, F. P., BERGMAN, T. L., DEWITT. D. P., LAVINE, A. E., Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 3. ed. São Paulo. 2008.

JAHANBAKHSHIAN, N.; HAMDAMI, N. Numerical simulation of heat and mass transfer during heating and cooling parts of canned-green-olive pasteurization. Journal of Food Process Engineering, v. 44, n. 12, e13909, 2021.

JAY, J. M., LOESSNER, M. J., & GOLDEN, D. A.; Modern Food Microbiology (8th ed.). Springer, 2020.

JEANETTE, G. A Mini-Review Of Salting Techniques To Improve Food Quality. Journal of Food Engineering, 2001.

KIOSTAROPOULOS, A.E.; SARAVACOD, G.D. Thermal Diffusivity of Granular and Porous Foods at Low Moisture Content. Journal of Food Engineeting vol.33 lOl-109, 1997.

KIST, B B.; CARVALHO, C.; BELING, R. R.; Anuário brasileiro de Horti e Fruti 2021, Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz. 104p. ISSN 2107-0897, 2021.

KOUTCHMA, T.; Ultraviolet light in food preservation: Principles and applications. Trends in Food Science & Technology, 21(7), 373–380, 2010.

KRAVETS, M., ABEA, A., GUÀRDIA, M. D., MUÑOZ, I., E BAÑÓN, S.; Factors Limiting Shelf Life of a Tomato–Oil Homogenate (Salmorejo) Pasteurised via Conventional and Radiofrequency Continuous Heating and Packed in Polyethylene Bottles.Foods, v. 12, n. 20, p. 3882, 2023.

KREITH, F. e BOHN, M. Princípios da transmissão de calor. São Paulo: CENGAGE Learning, 623 p. ISBN 9788522102846. 2011.

KSURVESWARAN, S.; CAI, Y. Z.; CORKE, H.; SUN, M. Systematic evaluation of natural phenolic antioxidants from 133 Indian medicinal plants. Food Chemistry, v. 102, n. 3, p. 938-953, 2007.

LEONARDI, J. G.; AZEVEDO, B. M. Métodos de conservação de alimentos. Revista Saúde em Foco, v. 10, n. 1, 2018.

LEWIS, M. J. Heat treatment of foods: Ultra-High-Temperature Treatments. Encyclopedia of food microbiology (2nd ed.), pp. 187 – 192. Elsevier Inc., 2014.

LINS, M. A. A. Estudo analítico e numérico das propriedades termofísicas durante o processo de transferência de calor em produtos de forma cilíndrica. 262 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2013.

LIU, M.; LI, X. Q.; WEBER, C.; LEE, C. Y.; BROWN, J.; LIU, R. H. Antioxidant and antiproliferative activities of raspberries. Journal Agricultural Food Chemistry, v. 50, 2926–2930, 2002.

LUIKOV, A. V. Analytical heat diffusion theory. Academic Press. Ltd: London, 1968.
MACHADO, E. A. Pasteurização de polpa de manga usando coordenadas generalizadas tridimensionais. 2019. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019.

MA, Y., SUN, Z., & ZHOU, W.; Thermal processing effects on phenolic content and antioxidant capacity of tropical fruit pulps. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63(24), 5545–5553, 2015.

MACHADO, T.; F.; Potencial uso de bacteriocinas na conservação de alimentos / Terezinha Feitosa Machado – Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2023.

MAIA, A. S. P.; estudo do efeito de parâmetros físico-químicos na cinética e dimensionamento; dissertação mestrado; Instituto Politécnico de Tomar, 2012.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional / Clovis R. Maliska. - 2.ed. rev. e ampliada. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MARIANI, V. C.; AMARANTE, A. C. C.; COELHO, L. S. Estimativa da Condutividade Térmica Aparente de Purê de Cenoura durante Congelamento Usando Problema Inverso. Int. J. Food Sci. Technol,44, 1292 – 1303. 2009.

MARTINS, L. F. D.; NICOLAU, E. S.; GEBARA, C.; PFRIMER, R. T.; SILVA, L. S.; NEVES, L. C.; Parametros Físico-Químicos da Polpa de Gabiroba Submetida ou não a Pasteurização. In: 14 º CONPEEX - Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão., Goiânia. Anais... Goiânia: 2017.

MARTINS, R., SILVA, L., & OLIVEIRA, J.; Impact of thermal processing on protein content and functional properties of fruit pulps. Food Chemistry, 338, 127919, 2021.

MAURYA, N. K.; THAPA, A., & DIANA, G. N., Thermal Processing in Food Preservation: A Comprehensive Review of Pasteurization, Sterilization, and Blanching. J. Nutrition and Food Processing, v. 8, n. 5, 2025.

MEDEIROS, M. S. de. Determinação da difusividade térmica e descrição da transferência de calor durante o processo de pasteurização da polpa do coco verde. 2020. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2020.

MELLO, Dulcinéia de. O papel do psicólogo na saúde e qualidade de vida do trabalhador. Humaniza SUS, 2012.

MELO, F. F. Introdução a dinâmica dos fluidos computacional. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

MENEZES, M.F.S.C.; SIMEONI, C.P.; POLETTO, G.; BARIN, J.S.; CICHOSKI, A.J.; MENEZES, C.R. Microwave radiation: applications in foods and microbiological impacts on meat. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET e-ISSN 2236 1170 - v. 18. p. 90-100 Ed. Especial Mai. 2014.

MÖHLER, B.C. Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de Soja. Porto Alegre. 2010.

MORGADO, C. M. A.; SILVA, L. R. DA.; CORRÊA, T. DE O.; SANTOS, A. P. DOS.; CUNHA JUNIOR, L. C.; CAMPOS, A. J. DE. Refrigeração e atmosfera

modificada na conservação de frutas: uma breve revisão. Scientific Electronic Archives, [S. l.], v. 15, n. 10, 2022.

MÜLLER, W. A.; MARCZAK, L. D. F.; SARKIS, J. R. Thermal and kinetic integrated models applied for Aspergillus fumigatus inactivation during ohmic and conventional juice pasteurization. Journal of Food Engineering. Vol. 319, pages 110907, 2022.

NEVES, C. P.; RODRIGUES, K. L.; MELLO, J. F.; GANDRA, T. K. V. Microbiological evaluation of beef sold in Brazil and consumer knowledge about food safety. Acta Veterinaria Brasilica, v. 18, n. 2, 2024.

NOBRE, J. A. S. e LIMA, D. M. Tecnologia do Processamento de Alimentos: Projeto Formare - Grupo Ibmec Educacional, 2011, São Paulo, Fundação Iochpe / Cadernos Formare, p. 448, 2011.

DAI, Y.; HOGAN, S.; SCHMELZ, E. M.; JU, Y. H.; CANNING, C.; ZHOU, K.;. Selective growth inhibition of human breast cancer cells by graviola fruit extract in vitro and in vivo involving downregulation of EGFR expression. Nutr. Canc. 2011.

OISHI, T. K.; GUT, J. A. W. Modelagem do histórico-tempo e temperatura e do valor de esterilização do purê de manga sob pasteurização convencional e assistida por micro-ondas. International Journal of Food Engineering, v. 17, n. 9, p. 737-745, 2021.

O'CONNOR, P. M.; KUNIYOSHI, T. M.; OLIVEIRA, R. P. S.; HILL, C.; ROSS, R. P.; COTTER, D. P. Antimicrobials for food and feed; a bacteriocin perspective. Current Opinion in Biotechnology, v. 61, p. 160-167, 2020.

OLIVEIRA, L. E. A de; MENDONÇA, C. C. A de; MANGANELLI, K. T; SOUSA, M R de; MENDONÇA, K. S de; ORTIZ, G P. T; CARLOS, F G; CORRÊA, J. L; SOUZA, A. U. de; Utilização do teste de dominância temporal das sensações - tds, na polpa de maracujá pasteurizada por método convencional e por micro-ondas IFMG Campus Bambuí, XII Jornada Científica. 2019.

ÖZIŞIK, M. N. Transferência de calor, Rio de Janeiro, RJ. Guanabara Koogan S.A, 1990.

PALLAZOLA, V. A.; DAVIS, D. M.; WHELTON, S. P.; CARDOSO, R.; LATINA, J. M.; MICHOS, E. D.; SARKAR, S.; BLUMENTHAL, R. S.; ARNETT, D. K.; STONE, N. J.; WELTY, F. K.; A clinician's guide to healthy eating for cardiovascular disease prevention. Mayo Clinic Proceedings: Innovations, Quality & Outcomes, v. 3, n. 3, p. 251–267, 2019.

PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 197 p. 1980.

PEDROSA, M. G.; Fruticultura – 1. ed. – Brasília: NT. Editora. 178 p. il., 2015.

PELAIS, A. C. A.; ROGEZ, H.; PENA, R. S. Estudo da pasteurização da polpa de murici. Alimentos e Nutrição, v. 19, n. 1, p. 17 – 24, 2008.

PENG, J; TANG, J; BARRETT, D.M; SABLANI, S.S; ANDERSON, N; POWERS, J.R. Thermal Pasteurization of Vegetables: Critical Factors for Process Design and Effects on Quality. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, DOI: 10.1080/10408398.2015.1082126. 2015.

PEREDA, J.A.O.; RODRIGUEZ, M. I. C.; ÁLVAREZ, L. F.; SANZ, M. L. G.; MINGUILLÓN, G. D. G. F.; PERALES, L. H.; CORTECERO, M. D. S. Tecnologia de Alimentos: Componentes dos Alimentos e Processos. Porto Alegre: Artmed, 1. ed. v. 1. 2005.

PETERS, M.; BADRIE, N.; EDWARD. Processing and quality evaluation of soursop (*Annona muricata L*) nectar. Journal of Food Quality. v. 24. p. 361 – 374. 2007.

PINTO. A. C. DE Q.; SILVA, E. M. A cultura da graviola; Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. Centro de pesquisa agropecuária dos cerrados, Brasília; Embrapa SPI. l06. 16 cm - (Coleção plantar. 31) ISBN 85-85007-59-1, 1995.

PLAZL, I.; LAKNER, M.; KOLOINI, T. Modeling of temperature distributions in canned tomato based dip during industrial pasteurization. Journal of food engineering, v. 75, n. 3, p. 400 – 406, 2006.

PORTARIA Nº 104, Ministério da Saúde, de 25 de janeiro de 2011.

PROENÇA, R.P.C. Desafios atuais da alimentação humana. Florianópolis: Insular, 2. ed., 2000.

PULIDO, R.; BRAVO, L.; SAURA-CALIXTO, F. Antioxidant Activity of Dietary Polyphenols As Determined by a Modified Ferric Reducing/Antioxidant Power Assay; Journal of Agricultural and Food Chemistry , v.48, n 8, p. 3396-3402, 2000.

QUEIROGA, V. D. P., GOMES, J. P., MENDES, N. V. B., QUEIROZ, A. J. D. M., DE MELO, B. A., LIMA, D. D. C., & DE ALBUQUERQUE, E. M. B. TECNOLOGIAS DE PLANTIO E UTILIZAÇÃO. Graviola (Annona muricata, L.): Tecnologias de plantio e utilização. 1ed.– Campina Grande: AREPB, 2024.

RADY, I., BLOCH, M. B., CHAMCHEU, R. N., MBEUMI, S. B., ANWAR, M. R., MOHAMED, H., BABATUNDE, A. S.; KUIATE, J. R.; NOUBISSI, F. K.; EL SAYED, K. A.; WHITFIELD, G. K.; CHAMCHEU, J. C. Anticancer properties of Graviola (Annona muricata): A comprehensive mechanistic review. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. Vol. 2018: 1-40. 2018.

RASTOGI, N. K., RAGHAVARAO, K. S. M. S., NIRANJAN, K., & KNORR, D.; Opportunities and challenges in high pressure processing of fruits and vegetables. Food Bioprocess Technology, 1(1), 61–77, (2007).

REVISTA INSUMOS: Pasteur, Pasteurização e Pasteurizador. Disponível em: http://www. insumos.com.br/sorvetes_e_casquinhas/materias/77.pdf. Acesso em: 24 set. 2021.

RIBEIRO, B. D.; PEREIRA, K. S.; NASCIMENTO, R. P.; COELHO, M. A. Z.;. Microbiologia Industrial: Alimentos. Elsevier Rio de Janeiro. Brasil, 2018.

RIEDEL, L. Measurement of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. Kaltetechnik-Klimatisierung, Karlsruhe, 21(11), 315-321, 1969.

RODARTE, H. Graviola: Fruta tropical que une sabor e saúde, Revista Agrocampo, Cruz Alta,RS, 2025. Acesso em 23 de abril de 2026.

RODRIGUEZ-SAONA, L. E., & WROLSTAD, R. E.; Extraction, isolation, and purification of anthocyanins. Journal of Food Science, 66(6), 1576–1582, 2001.

RUSSO, G.; GUT, J. A. W.; BOLDOR, D. Multiphysics modeling and validation of a microwave applicator with a three-stub tuner for the continuous flow pasteurization of fruit juices with low reflection. Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 9, 2025

SANTOS, B. A.; CAMPOFIORITO, M. C. M.; PINTO, J. L. F.; PENTEADO, S. H. N. W.; FONSECA, F.L.A.; GEHRKE, F. S. Microbiological analysis of the acai berry products marketed in the city of São Paulo. Universidade Paulista – UNIP – Campus Tatuapé – São Paulo, SP, Brasil. 2016.

SANTOS, R. A. Análise do cenário internacional da fruticultura e dos desafios encontrados para exportação de frutas brasileiras. 45 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Gestão do Agronegócio) — Universidade de Brasília, Planaltina-DF, 2021.

SÃO JOSÉ, A. R.; PIRES, M. M.; FREITAS, A. L. G. E.; RIBEIRO, D. P.; PEREZ, L. A. A. Atualidades e perspectivas das anonáceas no mundo. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 36, p. 86-93, 2014.

SHYAM S. SABLANI, CHANDRASHEKHAR R. SONAR, JUMING TANG, Thermal Pasteurization, Reference Module in Food Science, Elsevier, 2023.

SILVA JUNIOR, A. F.; SILVA, W. P. Desidratação osmótica e secagem complementar de fatias de banana: desenvolvimento de ferramentas numéricas e computacionais. Novas Edições Acadêmicas: nº p. 272, 2018.

SILVA JUNIOR, A. F; SILVA W. P.; AIRES, J. E. F.; FARIA, AIRES, K. L. C. A. Numerical approach to describe complementary drying of banana slices osmotically dehydrated, Jornal Heat and Mass Transfer, v. 54, p.267-276, 2018.

SILVA JÚNIOR, A.F.S.; AIRES, J.E.F.; AIRES, K.L.C.A.F.; SILVA, C.M.D.P.S.; FARIAS, V.S.O. Effects of Salt ConcentrationonOsmotic Dehydrationof Green Bean. Journal of Agricultural Studies ISSN 2166-0379, Vol. 3, No. 1., 2015.

SILVA, B. R.; CARON, V. C.; Perda nutricional em polpas de frutas: revisão de literatura, Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 8, n. 11, p. 234 – 242, DOI: 10.51891/rease. v8i11.7685, 2022.

SILVA, C. M. D. P. da S. e. Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição da secagem de sólidos na forma de cilindros e de elipsóides. 2012. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2012.

SILVA, M.A.C.; SILVA, Z.E.; OLIVEIRA, E.P.; OLIVEIRA, A.S.S.; SILVA, C.K.F. Determinação de propriedades termofísicas da polpa de acerola: aplicação do método flash. Campina Grande – Paraíba – Brazil, 2010.

SILVA, W P.; CLEIDE M. D. P. S. e SILVA; SOUTO, L. M.; GOMES. J. P.; QUEIROS, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Thermal properties determination of a cylindrical product during its cooling: two-dimensional numerical model and uncertainty, International Journal of Properties, v. 22, p. 343-354, 2019.

SILVA, W. P. da; SILVA, C. M. D. P. S.; LINS, M. A. A.; COSTA, W. S. Optimal removal of experimental points to determine apparent thermal diffusivity of canned products. International Journal of Food Engineering, Berlin, v. 10, n. 2, p. 223-231, 2014.

SILVA, W. P. Discretizações em fenômenos de transporte computacional, Cursos 1 e 2 (2009) Apresentações em Powerpoint, online, disponível no endereço eletrônico: http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm, 2009.

SILVA, W. P. Transporte Difusivo em Sólidos com forma arbitrária usando Coordenadas Generalizadas. 2007. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SILVA, W. P.; MEDEIROS, M. S.; GOMES, J. P.; SILVA, C. M. D. P. S. Improvement of methodology for determining local thermal diffusivity and heating time of green coconut pulp during its pasteurization, Journal of Food Engineering, Volume 285, Article 110104, 2020.

SILVA, W. P.; ATAÍDE, J. S. P.; OLIVEIRA, M. E. G.; C. M. D. P. S.; NUNES, J. S. Heat transfer during pasteurization of fruit pulps stored in containers with arbitrary

geometries obtained through revolutinon of flat áreas. Journal of Food Engineering, 227,2018b, p. 58 – 67.

SILVA, W. P.; ATAÍDE, J. S. P.; OLIVEIRA, M. E. G.; SILVA, C M. D. P. S.; NUNES, J. S. Heat transfer during pasteurization of fruit pulps stored in containers with arbitrary geometries obtained through revolution of flat áreas. Journal of Food Engineering, v. 217, 2017.

SILVA, W. P.; CLEIDE M. D. P. S. e SILVA; FARIAS, V. S. O.; DIOGO D. P. S. e SiILVA. Calculation of the convective heat transfer coefficient and cooling kinetics of an individual fig fruit. Jornal Heat and Mass Transfer, v. 46, p. 371-380, 2010.

SILVA, W. P.; CLEIDE MARIA D. P. S. e SILVA; SOUTO, L. M.; MOREIRA, I. S.; SILVA, E. C. O. Mathematical model for determining thermal properties of whole bananas with peel during the cooling process. Journal of Food Engineering, v. 227, p. 11 – 17, 2018a.

SILVA, A., PEREIRA, C., & SANTOS, M.; Effect of pasteurization on organic acids and pH in tropical fruit pulps. International Journal of Food Science & Technology, 55(8), 3260–3270, 2020.

SIGUEMOTO, É. S., PIRES, M. N., FUNCIA, E. DOS S., E GUT, J. A. W.; Evaluation and modeling of a microwave-assisted unit for continuous flow pasteurization of liquid foods: residence time distribution, time–temperature history, and integrated lethality. Journal of Food Process Engineering, 41(8), 1-13, 2018.

SIMÕES, M.R.; MURR, F.E.X.; Determinação da difusividade térmica da polpa da manga. Acta Scientiarum, ISSN 1415-6814. 22(5), p. 1225-1228, 2000.

SOBRAL, M.C.; NUNES, C.; MAIS, A.; FERREIRA, P.; COIMBRA, M.A. Conditions for producing long shelf life fruit salads processed using mild pasteurization. LWT - Food Science and Technology xxx , p. 1 – 8, 2016.

SOUSA, F. C.; SILVA, L. M. M.; CASTRO, D. S.; NUNES, J. S.; SOUSA, E. P. Propriedades Físicas e Físico-Químicas da Polpa de Juazeiro. Revista Verde de Agroecologia, v. 8, n. 2, p. 68-71, abr./jun., 2014.

SOUZA, D. Estudo das propriedades Físicas de Polpas e Néctares de Pequenos Frutos. 2008. 191p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil.

SOUZA, G. A, Modelo hidrodinâmico em regime permanente de um sistema submarino rebocado. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Joinville. Engenharia Naval. 29 de julho de 2022.

SOUZA, L. C. Caracterização e propriedades bioativas de polpa de graviola, resíduo in natura e desidratado. Itapetinga: UESB, 2015.

SÜRMELI, B. G. ; WEISHAUPT, I. ; SCHWARZER, K. ; MORIZ, N. ; SCHNEIDER, J.: Heat impact control in flash pasteurization by estimation of applied pasteurization units using near infrared spectroscopy. In: Journal of Near Infrared Spectroscopy Bd. 29, Sage Publishing, Nr. 6, S. 339–351, 2021.

TANNURA, L. T. T.; MATSUBARA, A. C. S.; PASTANA, R. B.; RIBEIRO, MARIA L. N.; GONÇALVES, A. T. I.; PELLARIN, L. A.; YOSHIKAWA, A. H.; PILON, M. M. I.; POSSEBON, L.; GIROL, A. P. comparative study of the phytochemical and cytotoxic profiles of the alcoholic extract of soursop (annona muricata) and custard apple (annona squamosa) leaves; 16(2): 169-175, jul.-dez. 2022.

TEIXEIRA, C. K. B.; NEVES, E. C. A.; PENA, R. D. S. Estudo da pasteurização da polpa de graviola. Alimentos e Nutrição, Araraquara, v. 17, n. 3, p. 251-257, 2006.

TELLES, E.O. Microorganismos deteriorantes, patogênicos e tecnológicos. Fatores intrínsecos e extrínsecos. VPS 2201 2 – higiene e segurança alimentar- 2012.

TRES, M. V.; BORGES, G. R.; CORAZZA, M. L.; ZAKRZEVSKI, C. A. Determinação da difusividade térmica de alimentos: medidas experimentais e simulação numérica. Perspectiva, v.35, n.131, p. 43-56. 2011.

VASCONCELOS, M. A. S.; MELO FILHO, A. B. Conservação de alimentos. Programa Escola Técnica Aberta do Brasil. ufrpe/codai, edufrpe. Recife-pe, 2010.

VASQUES, R. P. Microbiologia de alimentos e segurança alimentar: A jornada do alimento seguro. Editora Impacto Científico, p. 170-177, 2025.

VICENTE, A. R., COSTA, A. S. G., & MARTÍNEZ, G. A.; Thermal processing and bioactive compounds in fruits and vegetables. Trends in Food Science & Technology, 20(9), 472–481, 2009.

WAZED, M. A, XEQUE, M. A. M, AKHTARUZZAMAN, M., AWAL, M. S, MOZUMDER, N. H. M. R. Quality evaluation and shelf life analysis of fruit juice cocktail containing Mango (Mangifera indica) and Pineapple (Ananas comosus), Journal of Agriculture and Food Research, Volume 14, Article number 100773, December, 2023.

WOJSLAW, E.B. Tecnologia de alimentos. Brasília, 2013.

YAJID AI, AB RAHMAN HS, WONG MPK, WAN ZAIN WZ. MALAYSYS J Med Sci. 2018 Feb;25(1):5-15. doi: 10.21315/mjms2018.25.1.2. PMID: 29599630. Epub, Feb 28, 2018.

YAJID, A.I., AB RAHMAN, H.S.; WONG, M.P.K.; ZAIN, W.Z.W. Potential benefits of Annona muricata in combating cancer: A review. The Malaysian journal of medical sciences, v. 25, n. 1, p.5-15, 2018.

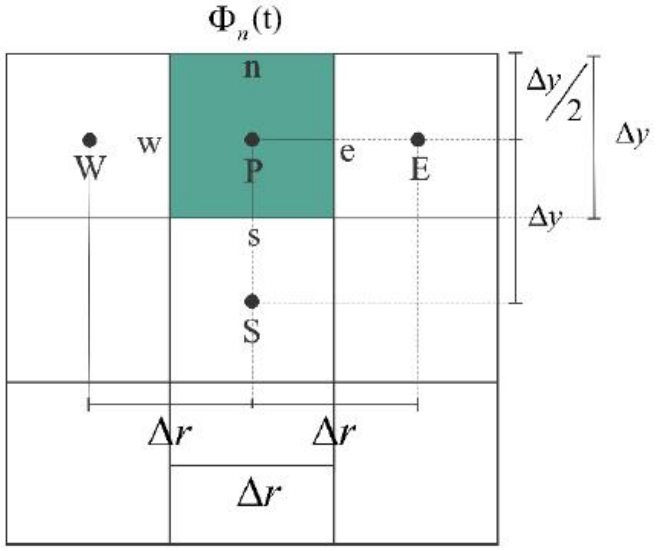
APÊNDICE A

Discretização dos volumes de controle malha bidimensional

Discretização da equação de difusão para o volume de controle ao norte

O volume ao norte possui vizinhos a oeste, a leste e ao sul. A fronteira norte está em contato com o meio externo, como mostra a Figura A.1.

Figura A.1: Volume ao norte com vizinhos a oeste, a leste e ao sul.



Fonte: SILVA JUNIOR, 2015.

Da análise da Figura A.1 pode-se definir as derivadas nas interfaces entre o volume de controle P e seus vizinhos

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_e \cong \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e} \tag{A.1}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_w \cong \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r_w} \tag{A.2}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_n \cong \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n / 2} \tag{A.3}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_s \cong \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \tag{A.4}$$

Substituindo A.1, A.2, A.3 e A.4 em 3.4, da seção 3, obtém-se:

$$\lambda_p \Phi_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} - \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} = \left[r_e \Gamma_e^{\Phi} \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r} \right) \Delta y - r_w \Gamma_w^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r} \right) \Delta y \right] + \left[r_p \Gamma_n^{\Phi} \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n / 2} \right) \Delta r - r_p \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y} \right) \Delta r \right] + (S_C + S_P \Phi_p) r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.5)}$$

Organizando os termos de forma apropriada, é obtida a seguinte equação algébrica para os volumes de controle norte:

$$A_p \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + B \quad \text{(A.6)}$$

onde:

$$A_P = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + {}_w\Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} + r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n / 2} + r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} - S_P r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.7)}$$

$$A_e = r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \quad \text{(A.8)}$$

$$A_w = r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} \quad \text{(A.9)}$$

$$A_n = r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \quad \text{(A.10)}$$

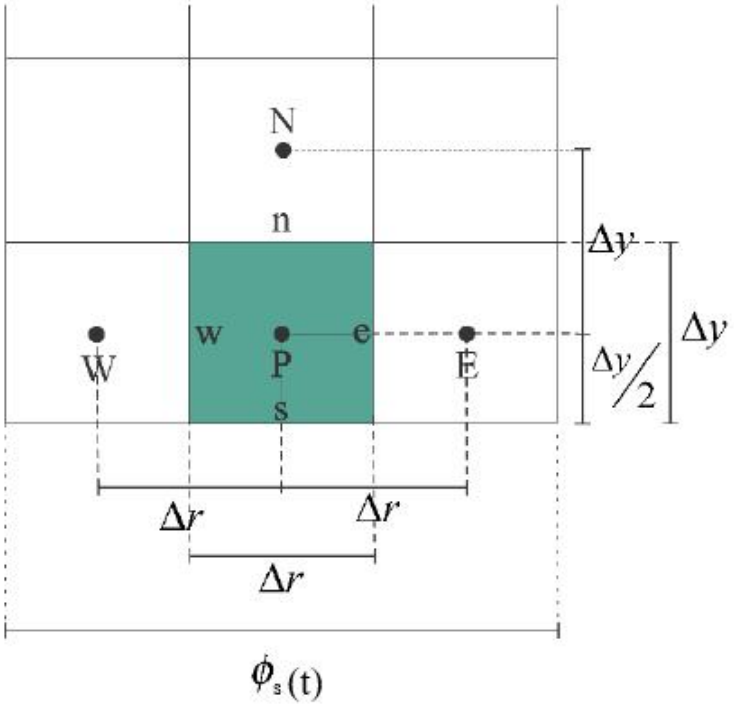
$$A_s = r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} \quad \text{(A.11)}$$

$$B = \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + 2 r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \Phi_n(t) + S_C r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.12)}$$

Discretização da equação de difusão para o volume de controle sul e seus vizinhos ao norte, a oeste e a leste.

O volume ao sul possui volumes vizinhos ao norte, a leste e a oeste, e a fronteira “s” no eixo de simetria, como mostra a Figura A.2.

Figura A.2: Volume ao sul e seus vizinhos ao norte, a oeste e a leste.



Fonte: SILVA JUNIOR, 2015.

Da análise da Figura A.2 pode-se definir as derivadas nas interfaces entre o volume de controle P e seus vizinhos

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_e \cong \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e} \tag{A.13}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_w \cong \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r_w} \tag{A.14}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_n \cong \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \tag{A.15}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_s \cong \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s / 2} \tag{A.16}$$

Substituindo A.13, A.14, A.15 e A.16 em 3.4, da seção 3, obtém-se:

$$\begin{aligned}\lambda_p \Phi_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} - \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} = & \left[r_e \Gamma_e^{\Phi} \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e} \right) \Delta y - r_w \Gamma_w^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r_w} \right) \Delta y \right] \\ & + \left[r_p \Gamma_n^{\Phi} \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \right) \Delta r - r_p \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s / 2} \right) \Delta r \right] \\ & + (S_C + S_P \Phi_p) r_p \Delta r \Delta y\end{aligned} \tag{A.17}$$

Organizando os termos de forma apropriada, é obtida a seguinte equação algébrica para os volumes de controle norte:

$$A_p \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + B \tag{A.18}$$

onde:

$$A_P = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + {}_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} + r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s / 2} - S_P r_p \Delta r \Delta y \tag{A.19}$$

$$A_e = r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \tag{A.20}$$

$$A_w = r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} \tag{A.21}$$

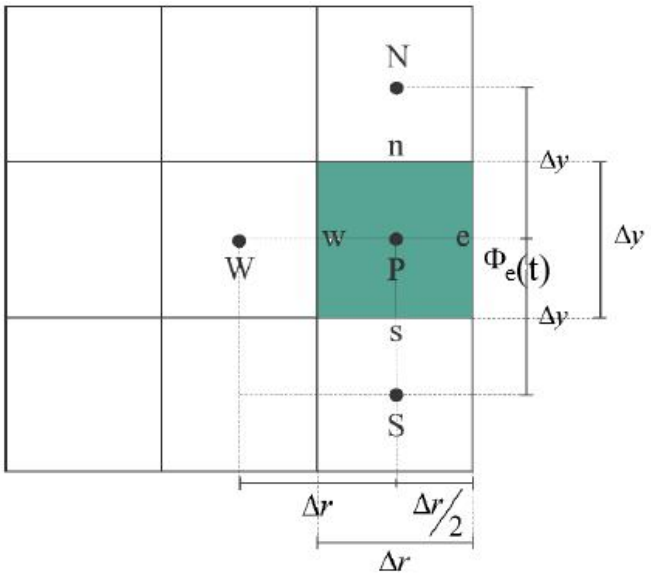
$$A_n = r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \tag{A.22}$$

$$B = \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + 2 r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \Phi_s(t) + S_C r_p \Delta r \Delta y \tag{A.23}$$

Discretização da equação de difusão para o volume de controle a leste

O volume de controle a leste possui volumes vizinhos ao norte, a oeste e ao sul, e a fronteira leste está em contato com o meio externo.

Figura A.3: Volume de controle leste e seus vizinhos ao norte, ao sul e a oeste.



Fonte: SILVA JUNIOR, 2015.

Da análise da Figura A.3 pode-se definir as derivadas nas interfaces entre o volume de controle P e seus vizinhos

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_e \cong \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e / 2} \tag{A.24}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_w \cong \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r_w} \tag{A.25}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_n \cong \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \tag{A.26}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_s \cong \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \tag{A.27}$$

Substituindo A.24, A.25, A.26 e A.27 em 3.4, da seção 3, obtém-se:

$$\lambda_p \Phi_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} - \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} = \left[r_e \Gamma_e^{\Phi} \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e / 2} \right) \Delta y - r_w \Gamma_w^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r_w} \right) \Delta y \right] + \left[r_p \Gamma_n^{\Phi} \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \right) \Delta r - r_p \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \right) \Delta r \right] + (S_C + S_P \Phi_p) r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.28)}$$

Organizando os termos de forma apropriada, é obtida a seguinte equação algébrica para os volumes de controle norte:

$$A_p \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + B \quad \text{(A.29)}$$

onde:

$$A_P = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + 2 r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + {}_w\Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} + r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} - S_P r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.30)}$$

$$A_w = r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} \quad \text{(A.31)}$$

$$A_n = r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \quad \text{(A.32)}$$

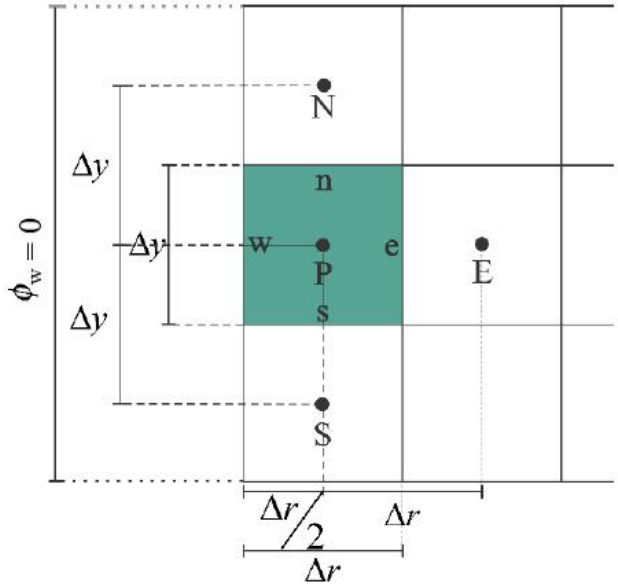
$$A_s = r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} \quad \text{(A.33)}$$

$$B = \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + 2 r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \Phi_e(t) + S_C r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.34)}$$

Discretização da equação de difusão para o volume de controle a oeste

O volume de controle a oeste possui volumes de controle vizinhos ao norte, a leste e ao sul, e possui a fronteira oeste no eixo central.

Figura A.4: Volume de controle a oeste e seus vizinhos ao norte, ao sul e a leste.



Fonte: SILVA JUNIOR, 2015.

Da análise da Figura A.4 pode-se definir as derivadas nas interfaces entre o volume de controle P e seus vizinhos

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_e \cong \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e} \tag{A.35}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_w \cong \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r_w / 2} = 0 \tag{A.36}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_n \cong \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \tag{A.37}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_s \cong \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \tag{A.38}$$

Substituindo A.35, A.36, A.37 e A.38 em 3.4, da seção 3, obtém-se:

$$\lambda_p \Phi_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} - \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} = \left[r_e \Gamma_e^{\Phi} \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e / 2} \right) \Delta y \right] + \left[r_p \Gamma_n^{\Phi} \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \right) \Delta r - r_p \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \right) \Delta r \right] + (S_C + S_P \Phi_p) r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.39)}$$

Organizando os termos de forma apropriada, é obtida a seguinte equação algébrica para os volumes de controle norte:

$$A_p \Phi_P = A_e \Phi_E + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + B \quad \text{(A.40)}$$

onde:

$$A_P = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} - S_P r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.30)}$$

$$A_e = r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \quad \text{(A.41)}$$

$$A_n = r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \quad \text{(A.42)}$$

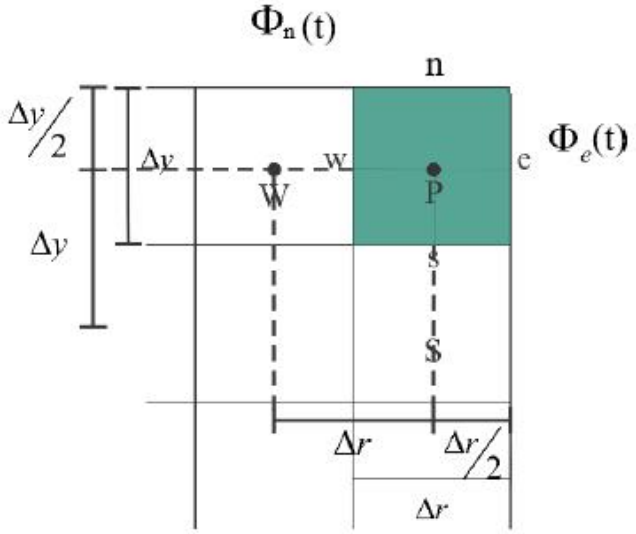
$$A_s = r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} \quad \text{(A.43)}$$

$$B = \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} - S_C r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.44)}$$

Discretização da equação de difusão para o volume de controle a nordeste

O volume de controle a nordeste possui as fronteiras ao norte e a leste em contato com o meio externo, e volumes de controle vizinhos a oeste e ao sul, como mostra a Figura A.5.

Figura A.5: Volume de controle nordeste com seus volumes de controle vizinhos a oeste e ao sul.



Fonte: SILVA JUNIOR, 2015.

Da análise da Figura A.5 pode-se definir as derivadas nas interfaces entre o volume de controle P e seus vizinhos

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_e \cong \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e / 2} \tag{A.45}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right|_w \cong \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r_w} \tag{A.46}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_n \cong \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n / 2} \tag{A.47}$$

$$\left.\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right|_s \cong \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \tag{A.48}$$

Substituindo A.45, A.46, A.47 e A.48 em 3.4, da seção 3, obtém-se:

$$\lambda_p \Phi_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} - \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} = \left[r_e \Gamma_e^{\Phi} \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r_e / 2} \right) \Delta y \right] + \left[r_p \Gamma_n^{\Phi} \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n / 2} \right) \Delta r - r_p \Gamma_s^{\Phi} \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \right) \Delta r \right] + (S_C + S_P \Phi_p) r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.49)}$$

Organizando os termos de forma apropriada, é obtida a seguinte equação algébrica para os volumes de controle norte:

$$A_p \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + B \quad \text{(A.50)}$$

onde:

$$A_P = \lambda_p \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + 2 r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} + r_w \Gamma_w^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_w} + 2 r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} + r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} - S_P r_p \Delta r \Delta y \quad \text{(A.51)}$$

$$A_e = r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r_e} \quad \text{(A.52)}$$

$$A_n = r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_n} \quad \text{(A.53)}$$

$$A_s = r_p \Gamma_s^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y_s} \quad \text{(A.54)}$$

$$B = \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{r_p \Delta r \Delta y}{\Delta t} + 2 r_e \Gamma_e^{\Phi} \frac{\Delta y}{\Delta r} \Phi_e(t) + 2 r_p \Gamma_n^{\Phi} \frac{\Delta r}{\Delta y} \Phi_n(t) - S_C \, r_p \, \Delta r \, \Delta y \quad \text{(A.55)}$$

APÊNDICE B

Tabelas dados experimentais

Tabela B.1: GR1 sensor 1, dados no contorno da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,5	1921	63,8	4401	64,9	-	-
10	36,8	2001	63,6	4481	64,8	-	-
20	34,2	2081	63,9	4561	65,0	-	-
30	46,8	2161	63,8	4641	64,9	-	-
40	48,7	2241	64,1	4721	64,8	-	-
50	49,9	2321	64,0	4801	65,0	-	-
60	50,7	2401	64,3	4881	64,8	-	-
70	51,5	2481	64,3	4961	65,0	-	-
81	52,1	2561	64,3	5041	64,8	-	-
161	55,1	2641	64,4	5121	64,9	-	-
241	56,7	2721	64,3	5201	64,8	-	-
321	57,8	2801	64,5	5281	65,0	-	-
401	58,6	2881	64,4	5361	64,9	-	-
481	59,4	2961	64,6	5441	64,9	-	-
561	60,2	3041	64,4	5521	65,0	-	-
641	60,8	3121	64,6	5601	64,8	-	-
721	60,9	3201	64,5	5681	65,0	-	-
801	61,2	3281	64,7	5761	64,8	-	-
881	61,7	3361	64,5	5841	65,0	-	-
961	61,8	3441	64,9	5921	65,0	-	-
1041	62,0	3521	64,7	6001	65,0	-	-
1121	62,1	3601	64,7	6081	65,0	-	-
1201	62,7	3681	64,9	6161	65,0	-	-
1281	62,6	3761	64,8	6241	65,0	-	-
1361	63,0	3841	64,9	6321	65,0	-	-
1441	62,9	3921	64,8	6401	65,0	-	-
1521	63,2	4001	65,0	6481	65,0	-	-
1601	63,0	4081	64,7	6561	65,0	-	-
1681	63,4	4161	64,9	6641	65,0	-	-
1761	63,6	4241	64,9	6721	65,0	-	-
1841	63,5	4321	64,7	6801	65,0	-	-

Tabela B.2: GR1 Sensor 2, dados no centro da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,6	1921	54,8	4401	64,4	6881	65,2
10	25,6	2001	55,6	4481	64,4	6961	65,2
20	25,6	2081	56,4	4561	64,4	7041	65,2
30	25,6	2161	57,1	4641	64,5	7121	65,2
40	25,6	2241	57,7	4721	64,5	7201	65,2
50	25,6	2321	58,3	4801	64,6	7281	65,2
60	25,6	2401	58,9	4881	64,6	7361	65,2
70	25,6	2481	59,3	4961	64,7	-	-
81	25,6	2561	59,8	5041	64,8	-	-
161	25,7	2641	60,2	5121	64,8	-	-
241	25,8	2721	60,6	5201	64,9	-	-
321	26,0	2801	61,0	5281	64,9	-	-
401	26,7	2881	61,3	5361	64,9	-	-
481	27,7	2961	61,7	5441	64,9	-	-
561	29,1	3041	61,9	5521	65,0	-	-
641	30,7	3121	62,1	5601	65,0	-	-
721	32,5	3201	62,4	5681	65,0	-	-
801	34,4	3281	62,6	5761	65,0	-	-
881	36,4	3361	62,8	5841	65,0	-	-
961	38,4	3441	63,0	5921	65,0	-	-
1041	40,3	3521	63,2	6001	65,0	-	-
1121	42,0	3601	63,4	6081	65,1	-	-
1201	43,7	3681	63,5	6161	65,1	-	-
1281	45,3	3761	63,6	6241	65,1	-	-
1361	46,8	3841	63,7	6321	65,1	-	-
1441	48,2	3921	63,8	6401	65,1	-	-
1521	49,6	4001	63,9	6481	65,1	-	-
1601	50,8	4081	64,0	6561	65,1	-	-
1681	52,0	4161	64,1	6641	65,1	-	-
1761	53,0	4241	64,3	6721	65,1	-	-
1841	53,9	4321	64,3	6801	65,1	-	-

Tabela B.3: GR1 Sensor 2, dados no centro da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	27,7	1921	63,6	4401	64,8	6881	64,9
10	33,6	2001	63,7	4481	64,9	6961	64,9
20	44,2	2081	63,8	4561	64,9	7041	64,9
30	46,9	2161	63,9	4641	64,9	7121	64,9
40	48,3	2241	63,9	4721	64,9	7201	64,9
50	49,5	2321	64,1	4801	64,9	7281	64,9
60	50,8	2401	64,1	4881	64,9	7361	64,9
70	51,2	2481	64,2	4961	64,9	7441	65,0
81	51,6	2561	64,2	5041	64,9	7521	65,0
161	54,7	2641	64,3	5121	64,8	7601	65,0
241	56,3	2721	64,3	5201	64,8	7681	65,0
321	57,8	2801	64,3	5281	64,8	7761	65,0
401	58,3	2881	64,3	5361	64,8	7841	65,0
481	59,1	2961	64,3	5441	64,8	7921	65,0
561	59,7	3041	64,4	5521	64,8	8001	65,0
641	60,2	3121	64,4	5601	64,8	8081	65,0
721	60,6	3201	64,5	5681	64,8	8161	65,0
801	61,1	3281	64,5	5761	64,9	8241	65,0
881	61,3	3361	64,5	5841	64,9	8321	65,0
961	61,8	3441	64,5	5921	64,9	8401	65,0
1041	61,9	3521	64,5	6001	64,9	8481	65,0
1121	62,2	3601	64,5	6081	64,9	8561	65,0
1201	62,4	3681	64,6	6161	64,9	8641	65,0
1281	62,6	3761	64,6	6241	64,9	8721	65,0
1361	62,7	3841	64,6	6321	65,0	8801	65,0
1441	62,9	3921	64,6	6401	64,9	8881	65,0
1521	63,0	4001	64,7	6481	64,9	8961	65,0
1601	63,1	4081	64,7	6561	64,9	9041	65,0
1681	63,4	4161	64,7	6641	64,9	9121	65,0
1761	63,4	4241	64,7	6721	64,9	9201	65,0
1841	63,5	4321	64,7	6801	64,9	9281	65,0

Tabela B.3: GR2 sensor 2, dados centro da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,1	1921	55,2	4401	64,3	6881	65,0
10	25,3	2001	56,0	4481	64,3	6961	65,0
20	25,4	2081	56,7	4561	64,4	7041	65,0
30	25,4	2161	57,4	4641	64,4	7121	65,0
40	25,4	2241	58,0	4721	64,5	7201	65,0
50	25,4	2321	58,6	4801	64,6	7281	65,0
60	25,4	2401	59,0	4881	64,6	7361	65,0
70	25,4	2481	59,5	4961	64,6	7441	65,0
81	25,4	2561	60,0	5041	64,7	7521	65,0
161	25,4	2641	60,4	5121	64,7	7601	65,1
241	25,4	2721	60,7	5201	64,8	7681	65,1
321	25,9	2801	61,1	5281	64,8	7761	65,1
401	26,6	2881	61,5	5361	64,8	7841	65,1
481	27,6	2961	61,8	5441	64,8	7921	65,1
561	29,1	3041	62,0	5521	64,9	-	-
641	30,7	3121	62,3	5601	64,9	-	-
721	32,6	3201	62,5	5681	64,9	-	-
801	34,6	3281	62,6	5761	64,9	-	-
881	36,5	3361	62,9	5841	64,9	-	-
961	38,5	3441	63,0	5921	64,9	-	-
1041	40,3	3521	63,2	6001	64,9	-	-
1121	42,1	3601	63,3	6081	65,0	-	-
1201	43,8	3681	63,5	6161	65,0	-	-
1281	45,4	3761	63,6	6241	65,0	-	-
1361	47,1	3841	63,7	6321	65,0	-	-
1441	48,5	3921	63,8	6401	65,0	-	-
1521	49,8	4001	63,9	6481	65,0	-	-
1601	51,0	4081	64,0	6561	65,0	-	-
1681	52,3	4161	64,1	6641	65,0	-	-
1761	53,3	4241	64,1	6721	65,0	-	-
1841	54,2	4321	64,2	6801	65,0	-	-

Tabela B.4: GR3 sensor 1, dados contorno da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,9	1921	63,0	4401	64,4	6881	64,5
10	29,8	2001	63,2	4481	64,4	6961	64,6
20	34,2	2081	63,2	4561	64,4	7041	64,6
30	37,5	2161	63,3	4641	64,4	7121	64,5
40	39,9	2241	63,5	4721	64,4	7201	64,5
50	41,8	2321	63,5	4801	64,4	7281	64,5
60	43,1	2401	63,6	4881	64,4	7361	64,5
70	43,9	2481	63,7	4961	64,4	7441	64,5
81	45,3	2561	63,8	5041	64,4	7521	64,5
161	50,0	2641	63,8	5121	64,5	7601	64,5
241	52,6	2721	63,9	5201	64,5	7681	64,5
321	54,4	2801	64,0	5281	64,5	7761	64,6
401	55,7	2881	64,0	5361	64,5	7841	64,5
481	56,8	2961	64,1	5441	64,5	7921	64,5
561	57,6	3041	64,2	5521	64,5	8001	64,5
641	58,4	3121	64,2	5601	64,5	8081	64,5
721	58,9	3201	64,2	5681	64,5	8161	64,5
801	59,4	3281	64,2	5761	64,5	8241	64,6
881	59,8	3361	64,2	5841	64,5	8321	64,6
961	60,1	3441	64,2	5921	64,5	8401	64,5
1041	60,5	3521	64,3	6001	64,5	8481	64,5
1121	60,8	3601	64,3	6081	64,5	8561	64,6
1201	61,1	3681	64,3	6161	64,5	8641	64,6
1281	61,6	3761	64,3	6241	64,5	8721	64,6
1361	61,8	3841	64,3	6321	64,5	8801	64,6
1441	62,1	3921	64,3	6401	64,5	8881	64,6
1521	62,2	4001	64,3	6481	64,5	-	-
1601	62,4	4081	64,4	6561	64,5	-	-
1681	62,6	4161	64,4	6641	64,5	-	-
1761	62,8	4241	64,4	6721	64,5	-	-
1841	62,9	4321	64,4	6801	64,5	-	-

Tabela B.5: GR3 sensor 2, dados centro da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,4	1921	55,6	4401	64,3	6881	65,0
10	25,4	2001	56,4	4481	64,4	6961	65,0
20	25,4	2081	57,0	4561	64,4	7041	65,0
30	25,4	2161	57,7	4641	64,4	7121	65,0
40	25,4	2241	58,3	4721	64,4	7201	65,0
50	25,4	2321	58,8	4801	64,5	7281	65,0
60	25,4	2401	59,3	4881	64,5	7361	65,0
70	25,4	2481	59,8	4961	64,6	7441	65,0
81	25,4	2561	60,3	5041	64,6	7521	65,0
161	25,4	2641	60,6	5121	64,6	7601	65,0
241	25,9	2721	61,0	5201	64,7	7681	65,0
321	26,7	2801	61,5	5281	64,7	7761	65,0
401	27,8	2881	61,7	5361	64,7	7841	65,0
481	29,3	2961	62,0	5441	64,7	7921	65,0
561	30,9	3041	62,1	5521	64,7	8001	65,0
641	32,7	3121	62,4	5601	64,7	8081	65,0
721	34,5	3201	62,6	5681	64,8	8161	65,0
801	36,4	3281	62,8	5761	64,8	-	-
881	38,3	3361	62,9	5841	64,8	-	-
961	40,1	3441	63,1	5921	64,9	-	-
1041	41,9	3521	63,4	6001	64,9	-	-
1121	43,6	3601	63,4	6081	64,9	-	-
1201	45,1	3681	63,5	6161	64,9	-	-
1281	46,7	3761	63,6	6241	64,9	-	-
1361	48,1	3841	63,7	6321	65,0	-	-
1441	49,4	3921	63,9	6401	65,0	-	-
1521	50,7	4001	64,0	6481	65,0	-	-
1601	51,8	4081	64,1	6561	65,0	-	-
1681	52,9	4161	64,1	6641	65,0	-	-
1761	53,9	4241	64,3	6721	65,0	-	-
1841	54,7	4321	64,3	6801	65,0	-	-

Tabela B.7: GR4 sensor 1, dados contorno da amostra

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	27,8	1921	63,2	4401	64,8	6881	64,9
10	35,4	2001	63,2	4481	64,8	6961	65,0
20	40,1	2081	63,3	4561	64,7	7041	65,0
30	40,1	2161	63,3	4641	64,8	7121	65,0
40	43,9	2241	63,6	4721	64,8	7201	65,0
50	46,0	2321	63,4	4801	64,8	7281	65,0
60	46,7	2401	63,6	4881	64,7	7361	65,0
70	47,6	2481	63,6	4961	64,7	7441	65,0
81	48,6	2561	63,8	5041	64,7	7521	65,0
161	52,5	2641	63,8	5121	64,9	7601	65,0
241	54,8	2721	63,9	5201	64,9	7681	64,9
321	56,0	2801	64,1	5281	64,9	7761	65,0
401	57,1	2881	64,1	5361	64,7	7841	65,0
481	57,8	2961	64,1	5441	64,8	7921	65,0
561	58,0	3041	64,1	5521	64,8	8001	65,0
641	58,9	3121	64,1	5601	64,9	8081	65,0
721	59,1	3201	64,2	5681	64,8	8161	65,1
801	59,6	3281	64,2	5761	64,7	8241	64,9
881	59,9	3361	64,3	5841	64,8	8321	64,9
961	60,6	3441	64,3	5921	64,8	8401	65,1
1041	60,7	3521	64,4	6001	64,8	8481	65,1
1121	61,1	3601	64,4	6081	64,9	8561	65,1
1201	61,1	3681	64,6	6161	64,9	8641	65,1
1281	61,7	3761	64,6	6241	64,9	8721	65,1
1361	61,7	3841	64,8	6321	64,9	8801	65,2
1441	62,1	3921	64,5	6401	64,9	-	-
1521	62,1	4001	64,6	6481	64,9	-	-
1601	62,4	4081	64,5	6561	64,9	-	-
1681	62,4	4161	64,6	6641	64,9	-	-
1761	62,8	4241	64,8	6721	64,9	-	-
1841	62,8	4321	64,8	6801	64,8	-	-

Tabela B.6: GR4 sensor 2, dados no centro da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,5	1921	55,3	4401	64,2	6881	64,9
10	25,5	2001	56,0	4481	64,3	6961	65,0
20	25,5	2081	56,8	4561	64,4	7041	65,0
30	25,5	2161	57,4	4641	64,4	7121	65,0
40	25,6	2241	57,9	4721	64,4	7201	65,0
50	25,6	2321	58,6	4801	64,4	7281	65,0
60	25,6	2401	59,0	4881	64,5	7361	65,0
70	25,6	2481	59,6	4961	64,5	7441	65,0
81	25,6	2561	60,0	5041	64,5	7521	65,0
161	25,9	2641	60,3	5121	64,6	7601	65,1
241	26,5	2721	60,7	5201	64,6	7681	65,1
321	27,3	2801	61,1	5281	64,7	7761	65,1
401	28,4	2881	61,3	5361	64,7	7841	65,1
481	29,8	2961	61,7	5441	64,8	7921	65,1
561	31,4	3041	61,8	5521	64,8	8001	65,1
641	33,0	3121	62,2	5601	64,8	8081	65,1
721	34,8	3201	62,3	5681	64,8	8161	65,1
801	36,6	3281	62,6	5761	64,8	8241	65,1
881	38,4	3361	62,7	5841	64,8	8321	65,1
961	40,2	3441	62,9	5921	64,8	8401	65,1
1041	41,9	3521	63,2	6001	64,8	8481	65,1
1121	43,5	3601	63,3	6081	64,8	8561	65,1
1201	45,0	3681	63,4	6161	64,8	8641	65,1
1281	46,5	3761	63,5	6241	64,9	8721	65,1
1361	47,9	3841	63,7	6321	64,9	8801	65,2
1441	49,3	3921	63,8	6401	64,9	-	-
1521	50,5	4001	63,8	6481	64,9	-	-
1601	51,6	4081	63,9	6561	64,9	-	-
1681	52,6	4161	63,9	6641	64,9	-	-
1761	53,5	4241	64,1	6721	64,9	-	-
1841	54,5	4321	64,2	6801	64,9	-	-

Tabela B.7: GR5 sensor 1, dados no contorno da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	27,1	1921	63,0	4401	65,8	-	-
10	34,0	2001	63,5	4481	65,7	-	-
20	39,4	2081	63,6	4561	65,8	-	-
30	42,5	2161	63,7	4641	65,6	-	-
40	44,5	2241	63,7	4721	65,7	-	-
50	45,5	2321	63,9	4801	65,8	-	-
60	46,6	2401	64,0	4881	66,1	-	-
70	47,5	2481	64,2	4961	66,1	-	-
81	48,2	2561	64,4	5041	66,1	-	-
161	51,7	2641	64,5	-	-	-	-
241	53,0	2721	64,7	-	-	-	-
321	55,2	2801	64,7	-	-	-	-
401	55,7	2881	64,7	-	-	-	-
481	56,1	2961	64,7	-	-	-	-
561	56,7	3041	64,7	-	-	-	-
641	57,3	3121	64,9	-	-	-	-
721	58,1	3201	65,1	-	-	-	-
801	58,7	3281	65,1	-	-	-	-
881	59,1	3361	65,2	-	-	-	-
961	59,5	3441	65,2	-	-	-	-
1041	59,8	3521	65,2	-	-	-	-
1121	60,2	3601	65,2	-	-	-	-
1201	60,5	3681	65,2	-	-	-	-
1281	61,1	3761	65,4	-	-	-	-
1361	61,3	3841	65,5	-	-	-	-
1441	62,0	3921	65,6	-	-	-	-
1521	62,0	4001	65,5	-	-	-	-
1601	62,2	4081	65,4	-	-	-	-
1681	62,4	4161	65,6	-	-	-	-
1761	62,6	4241	65,6	-	-	-	-
1841	62,8	4321	65,7	-	-	-	-

Tabela B.8: GR5 sensor 2, dados no centro da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,7	1921	54,9	4401	64,9	-	-
10	25,6	2001	55,8	4481	64,9	-	-
20	25,6	2081	56,6	4561	64,9	-	-
30	25,6	2161	57,2	4641	65,0	-	-
40	25,6	2241	57,8	4721	65,1	-	-
50	25,6	2321	58,5	4801	65,2	-	-
60	25,6	2401	59,0	4881	65,2	-	-
70	25,6	2481	59,6	4961	65,3	-	-
81	25,6	2561	60,2	5041	65,3	-	-
161	25,6	2641	60,6	5121	65,3	-	-
241	25,8	2721	60,9	5201	65,3	-	-
321	26,2	2801	61,3	5281	65,3	-	-
401	27,0	2881	61,6	5361	65,4	-	-
481	27,9	2961	61,9	5441	65,4	-	-
561	29,3	3041	62,2	5521	65,4	-	-
641	30,8	3121	62,6	5601	65,4	-	-
721	32,7	3201	62,8	5681	65,4	-	-
801	34,7	3281	63,0	5761	65,4	-	-
881	36,5	3361	63,2	5841	65,6	-	-
961	38,3	3441	63,4	5921	65,6	-	-
1041	40,2	3521	63,5	6001	65,6	-	-
1121	41,8	3601	63,7	6081	65,6	-	-
1201	43,5	3681	64,0	6161	65,6	-	-
1281	45,3	3761	64,1	6241	65,6	-	-
1361	46,8	3841	64,2	6321	65,6	-	-
1441	48,2	3921	64,3	6401	65,6	-	-
1521	49,5	4001	64,4	6481	65,6	-	-
1601	50,7	4081	64,4	-	-	-	-
1681	51,8	4161	64,5	-	-	-	-
1761	52,9	4241	64,8	-	-	-	-
1841	53,9	4321	64,9	-	-	-	-

Tabela B.9: GR6 sensor 1, dados contorno da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,6	1921	62,5	4401	65,1	-	-
10	27,0	2001	62,7	4481	65,4	-	-
20	29,6	2081	62,8	4561	65,3	-	-
30	31,8	2161	63,1	4641	65,3	-	-
40	33,9	2241	63,1	4721	65,3	-	-
50	34,5	2321	63,4	4801	65,5	-	-
60	35,7	2401	63,4	4881	65,4	-	-
70	36,8	2481	63,7	4961	65,5	-	-
81	37,9	2561	63,7	5041	65,4	-	-
161	45,5	2641	64,0	5121	65,4	-	-
241	49,1	2721	64,0	5201	65,4	-	-
321	51,3	2801	64,1	5281	65,4	-	-
401	52,5	2881	64,3	5361	65,5	-	-
481	52,9	2961	64,2	5441	65,4	-	-
561	54,9	3041	64,3	5521	65,5	-	-
641	55,0	3121	64,3	5601	65,4	-	-
721	56,5	3201	64,5	5681	65,6	-	-
801	56,7	3281	64,4	-	-	-	-
881	57,9	3361	64,6	-	-	-	-
961	58,0	3441	64,7	-	-	-	-
1041	59,0	3521	64,8	-	-	-	-
1121	59,0	3601	64,8	-	-	-	-
1201	60,0	3681	64,8	-	-	-	-
1281	60,0	3761	64,9	-	-	-	-
1361	60,8	3841	65,0	-	-	-	-
1441	60,7	3921	65,0	-	-	-	-
1521	61,3	4001	65,1	-	-	-	-
1601	61,3	4081	64,9	-	-	-	-
1681	61,8	4161	65,2	-	-	-	-
1761	61,8	4241	65,1	-	-	-	-
1841	62,5	4321	65,2	-	-	-	-

Tabela B.10: GR6 sensor 2, dados no centro da amostra.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,5	1921	52,0	4401	63,8	6881	65,2
10	25,4	2001	52,8	4481	63,8	6961	65,2
20	25,4	2081	53,6	4561	63,9	7041	65,2
30	25,4	2161	54,4	4641	64,1	7121	65,2
40	25,4	2241	55,2	4721	64,1	7201	65,3
50	25,4	2321	55,8	4801	64,2	7281	65,3
60	25,4	2401	56,5	4881	64,3	7361	65,3
70	25,4	2481	57,0	4961	64,4	7441	65,3
81	25,4	2561	57,6	5041	64,4	7521	65,3
161	25,4	2641	58,1	5121	64,5	7601	65,3
241	25,4	2721	58,6	5201	64,5	-	-
321	25,6	2801	59,0	5281	64,6	-	-
401	26,2	2881	59,5	5361	64,7	-	-
481	26,9	2961	59,9	5441	64,7	-	-
561	28,1	3041	60,1	5521	64,8	-	-
641	29,4	3121	60,5	5601	64,8	-	-
721	31,1	3201	60,8	5681	64,9	-	-
801	32,7	3281	61,1	5761	65,0	-	-
881	34,4	3361	61,4	5841	65,0	-	-
961	36,1	3441	61,7	5921	65,0	-	-
1041	37,8	3521	61,9	6001	65,0	-	-
1121	39,4	3601	62,2	6081	65,0	-	-
1201	41,0	3681	62,4	6161	65,0	-	-
1281	42,6	3761	62,6	6241	65,1	-	-
1361	44,0	3841	62,7	6321	65,1	-	-
1441	45,3	3921	62,8	6401	65,1	-	-
1521	46,6	4001	63,0	6481	65,1	-	-
1601	47,8	4081	63,2	6561	65,1	-	-
1681	48,9	4161	63,3	6641	65,1	-	-
1761	50,0	4241	63,5	6721	65,2	-	-
1841	51,1	4321	63,7	6801	65,2	-	-

Tabela B.11: GRM Temperatura média experimental no contorno da amostra de graviola durante a pasteurização.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	26,6	1921	63,2	4401	65,0	6881	64,8
10	32,8	2001	63,3	4481	65,0	6961	64,8
20	37,0	2081	63,4	4561	65,0	7041	64,8
30	40,9	2161	63,5	4641	65,0	7121	64,8
40	43,2	2241	63,7	4721	65,0	7201	64,8
50	44,5	2321	63,7	4801	65,1	7281	64,8
60	45,6	2401	63,8	4881	65,1	7361	64,8
70	46,4	2481	64,0	4961	65,1	7441	64,8
81	47,3	2561	64,0	5041	65,1	7521	64,8
161	51,6	2641	64,1	5121	64,9	7601	64,8
241	53,8	2721	64,2	5201	64,9	7681	64,8
321	55,4	2801	64,3	5281	64,9	7761	64,9
401	56,3	2881	64,3	5361	64,9	7841	64,8
481	57,0	2961	64,3	5441	64,9	7921	64,8
561	57,9	3041	64,4	5521	64,9	8001	64,8
641	58,4	3121	64,4	5601	64,9	8081	64,8
721	59,0	3201	64,5	5681	64,9	8161	64,9
801	59,5	3281	64,5	5761	64,7	8241	64,8
881	60,0	3361	64,6	5841	64,8	8321	64,8
961	60,3	3441	64,6	5921	64,7	8401	64,9
1041	60,7	3521	64,7	6001	64,7	8481	64,9
1121	60,9	3601	64,7	6081	64,8	8561	64,9
1201	61,3	3681	64,7	6161	64,8	8641	64,9
1281	61,6	3761	64,8	6241	64,8	8721	64,9
1361	61,9	3841	64,9	6321	64,8	8801	64,9
1441	62,1	3921	64,8	6401	64,8	8881	64,8
1521	62,3	4001	64,9	6481	64,8	8961	65,0
1601	62,4	4081	64,8	6561	64,8	9041	65,0
1681	62,7	4161	64,9	6641	64,8	9121	65,0
1761	62,8	4241	64,9	6721	64,8	9201	65,0
1841	63,0	4321	64,9	6801	64,7	9281	65,0

Tabela B.12: GRM Temperatura média experimental no centro da amostra de graviola durante a pasteurização.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
1	25,5	1921	54,6	4401	64,3	6881	65,1
10	25,5	2001	55,4	4481	64,4	6961	65,1
20	25,5	2081	56,2	4561	64,4	7041	65,1
30	25,5	2161	56,9	4641	64,5	7121	65,1
40	25,5	2241	57,5	4721	64,5	7201	65,1
50	25,5	2321	58,1	4801	64,6	7281	65,1
60	25,5	2401	58,6	4881	64,6	7361	65,1
70	25,5	2481	59,1	4961	64,7	7441	65,1
81	25,5	2561	59,7	5041	64,7	7521	65,1
161	25,6	2641	60,0	5121	64,8	7601	65,1
241	25,8	2721	60,4	5201	64,8	7681	65,1
321	26,3	2801	60,8	5281	64,8	7761	65,1
401	27,1	2881	61,2	5361	64,9	7841	65,1
481	28,2	2961	61,5	5441	64,9	7921	65,1
561	29,7	3041	61,7	5521	64,9	8001	65,1
641	31,2	3121	62,0	5601	64,9	8081	65,1
721	33,0	3201	62,2	5681	65,0	8161	65,1
801	34,9	3281	62,5	5761	65,0	8241	65,1
881	36,8	3361	62,7	5841	65,0	8321	65,1
961	38,6	3441	62,9	5921	65,0	8401	65,1
1041	40,4	3521	63,1	6001	65,0	8481	65,1
1121	42,1	3601	63,2	6081	65,1	8561	65,1
1201	43,7	3681	63,4	6161	65,1	8641	65,1
1281	45,3	3761	63,5	6241	65,1	8721	65,1
1361	46,8	3841	63,6	6321	65,1	8801	65,2
1441	48,2	3921	63,7	6401	65,1	-	-
1521	49,5	4001	63,8	6481	65,1	-	-
1601	50,6	4081	63,9	6561	65,0	-	-
1681	51,8	4161	64,0	6641	65,0	-	-
1761	52,8	4241	64,2	6721	65,0	-	-
1841	53,7	4321	64,3	6801	65,0	-	-