



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



ESTIMAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA EM PRODUTO
AQUECIDO POR CONDUÇÃO BASEADO EM PROBLEMA INVERSO

AUTORA: DANÚBIA LUCAS MEIRA GONTIJO

Uberlândia – MG
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTIMAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA EM PRODUTO AQUECIDO
POR CONDUÇÃO BASEADO EM PROBLEMA INVERSO**

Danúbia Lucas Meira Gontijo

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia – MG
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G641e 2023 Gontijo, Danúbia Lucas Meira, 1990-
Estimação da difusividade térmica em produto aquecido por
condução baseado em problema inverso [recurso eletrônico] / Danúbia
Lucas Meira Gontijo. - 2023.

Orientador: Rubens Gedraite.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.5066>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia Química. I. Gedraite, Rubens, 1958-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

André Carlos Francisco
Bibliotecário Documentalista - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Mestrado Acadêmico, 11/2023, PPGEQ				
Data:	27 de junho de 2023	Hora de início:	14:30	Hora de encerramento:	15:35
Matrícula do Discente:	12112EQU004				
Nome do Discente:	Danúbia Lucas Meira Gontijo				
Título do Trabalho:	Estimação da difusividade térmica em produto aquecido por condução baseado em problema inverso				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Modelagem, Controle e Otimização de Processos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de sistemas de controle de processos tolerantes a falhas				
ODS-ONU:	ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Leo Kunigk - Faculdade Engenheiro Salvador Arena, Sérgio Mauro da Silva Neiro - PPGEQ/UFU e Rubens Gedraite - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Rubens Gedraite, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/06/2023, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leo Kunigk, Usuário Externo**, em 27/06/2023, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Mauro da Silva Neiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/06/2023, às 15:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4579013** e o código CRC **49267EA0**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me guiou nessa jornada rumo ao título de Mestre em Engenharia Química.

Ao Professor Orientador Dr. Rubens Gedraite, que não mediu esforços para que eu conseguisse realizar o meu amado sonho de concluir o meu mestrado; Ele é um exemplo de profissional, que cultiva em seus alunos o desejo de aprender e o amor pela arte de lecionar.

Agradeço aos meus filhos, que a cada dia me tornam uma pessoa melhor e mais determinada a seguir os meus sonhos, pois sei que o exemplo é a melhor forma de ensino.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Resumo	ii
Abstract	iii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – JUSTIFICATIVA	1
1.2 – OBJETIVOS	1
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – PRIMÓRDIOS DO PROCESSAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS.....	3
2.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE ALIMENTOS ENLATADOS: ESTERILIZAÇÃO.....	4
2.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE ALIMENTOS ENLATADOS: TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PRODUTO ALIMENTÍCIO.....	6
2.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTROLE REGULATÓRIO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS.....	7
2.5 - ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS	8
2.8 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZADA.....	11
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 – AUTOCLAVE ESTACIONÁRIA UTILIZADA.....	23
3.2 – FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE	25
3.3 - MODELO MATEMÁTICO A PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS DESENVOLVIDO PARA O CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	28
3.4 – METODOLOGIA.....	32
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

Lista de Figuras

Figura 3.1:	Fluxograma de engenharia de uma autoclave estacionária vertical.....	24
Figura 3.2:	<i>Hardware</i> do sistema de controle da autoclave.....	25
Figura 3.3:	Perfil de temperatura da autoclave em função do tempo.....	26
Figura 3.4:	Discretização proposta para o conjunto embalagem/produto alimentício....	29
Figura 3.5:	Discretização melhorada para o conjunto embalagem/produto alimentício	29
Figura 3.6:	Diagrama de simulação para o cálculo de T(1,1) a T(1,4).....	30
Figura 3.7:	Diagrama de simulação para o cálculo de T(2,1) a T(2,4).....	30
Figura 3.8:	Diagrama de simulação para o cálculo de T(3,1) a T(3,4).....	31
Figura 3.9:	Diagrama de simulação para o cálculo de T(4,1) a T(4,4).....	31
Figura 3.10:	Diagrama de simulação para validação de T(1,1) a T(1,4).....	32
Figura 4.1:	Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,58E-08$ m ² /s)	33
Figura 4.2:	ERQA entre as temperaturas do patê de alcachofra ($9,58E-08$ m ² /s)	33
Figura 4.3:	Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,68E-08$ m ² /s)	34
Figura 4.4:	ERQA entre as temperaturas do patê de alcachofra ($9,68E-08$ m ² /s)	34
Figura 4.5:	Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,78E-08$ m ² /s)	35
Figura 4.6:	ERQA entre as temperaturas do patê de alcachofra ($9,78E-08$ m ² /s)	35
Figura 4.7:	Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,88E-08$ m ² /s)	36
Figura 4.8:	ERQA entre as temperaturas do patê de alcachofra ($9,88E-08$ m ² /s)	36
Figura 4.9:	Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,98E-08$ m ² /s)	37
Figura 4.10:	ERQA entre as temperaturas do patê de alcachofra ($9,98E-08$ m ² /s)	37

Resumo

A operação de esterilização tradicionalmente utilizada na indústria de alimentos é conhecida de longa data e ainda muito empregada na conservação de produtos alimentícios em conserva. O conhecimento do valor da propriedade de transporte de calor difusividade térmica é muito importante para que se possa definir o tempo requerido de tratamento térmico e, também, para permitir um melhor controle do processo face a variações na temperatura da autoclave. Neste trabalho é apresentado o modelo matemático que foi desenvolvido e testado no aplicativo matlab/simulink™ visando estimar o valor da difusividade térmica. O modelo foi empregado para simular o comportamento da temperatura do produto alimentício estudado a partir de um valor adotado para a difusividade térmica. Os resultados obtidos foram validados por comparação com os disponíveis na literatura e revelaram boa aderência a estes últimos, apresentando desvios inferiores a 5°C no pior caso.

Palavras-chave: esterilização de alimentos; modelo matemático; difusividade térmica.

Abstract

The sterilization operation traditionally used in the food industry has been known for a long time and is still widely used in the conservation of canned food products. Knowledge of the value of the heat transport property thermal diffusivity is very important in order to define the required heat treatment time and also to allow better control of the process in the face of variations in the temperature of the autoclave. This work presents the mathematical model that was developed and tested in the matlab/simulink™ application in order to estimate the value of thermal diffusivity. The model was used to simulate the temperature behavior of the studied food product based on a value adopted for the thermal diffusivity. The results obtained were validated by comparison with those available in the literature and showed good adherence to the latter, with deviations of less than 5°C in the worst case.

Keywords: food sterilization; mathematical model; thermal diffusivity.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – JUSTIFICATIVA

Um dos principais objetivos da indústria de alimentos é o aumento da vida de prateleira dos produtos alimentícios fabricados. Esta meta só pode ser alcançada através do emprego de técnicas de preservação que tendam a inibir as transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas que normalmente ocorrem nos mesmos.

A Tecnologia de Alimentos estuda os principais processos industriais empregados para a conservação dos produtos alimentícios que apresentam interesse comercial. Dentre esses processos de conservação pode-se citar – de um modo geral – aqueles que empregam o calor, aqueles que empregam o frio e aqueles que removem o conteúdo de água do alimento.

Nesta dissertação de mestrado é estudado o emprego do calor como agente de conservação de produtos alimentícios. É fato sabido que a atividade enzimática e microbiológica é função da temperatura e que quando um produto alimentício é submetido a temperaturas superiores às máximas em que se verificam essas atividades, os microrganismos e as enzimas são destruídos. Com base nesse comportamento é que as técnicas conhecidas como processamento térmico foram desenvolvidas. O processo de conservação mais importante que utiliza esta tecnologia é o enlatamento (*canning*, em inglês).

Esta pesquisa apresenta uma metodologia para se melhorar o desempenho do processamento térmico de alimento em conserva industrializado e acondicionado em embalagem metálica de geometria cilíndrica, aquecido pelo mecanismo de transporte de calor condutivo, desenvolvendo, implementando e validando um algoritmo computacional, baseado em modelo matemático, que seja executado em computador, independentemente das condições de operação da autoclave, com o objetivo de estimar o valor da propriedade de transporte de calor difusividade térmica do produto alimentício ensaiado, em diversas etapas do processo de esterilização. Adicionalmente, este algoritmo permitirá o cálculo do índice de letalidade imposto ao microrganismo de referência adotado.

1.2 – OBJETIVOS

Este trabalho tem como **objetivo geral** a determinação do valor da difusividade térmica de patê de alcachofra, acondicionado em embalagem metálica de geometria cilíndrica quecido pelo mecanismo de transporte de calor condutivo.

Dentre os **objetivos específicos**, destaca-se:

- Estimar o comportamento da temperatura do patê de alcachofra no ponto mais interno do conjunto embalagem/patê de alcachofra;
- Simular o comportamento dinâmico do sistema no aplicativo matlab™/simulink™.
- Comparar os valores de difusividade térmica entre si visando encontrar o valor mais próximo do seu valor médio global; e
- Avaliar o valor do maior erro estático que afeta os valores estimados de temperatura com base na metodologia proposta neste trabalho.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura, onde encontram-se reunidas informações relativas ao desenvolvimento histórico do controle de processos; considerações sobre o processo de enlatamento; modelamento matemático e estratégia de otimização e controle de processamento térmico de produtos alimentícios. Com base nestas informações, definiu-se a metodologia a ser empregada com o intuito de alcançar o objetivo proposto.

2.1 – PRIMÓRDIOS DO PROCESSAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS

Segundo **Berteli *et al.* (2013)**, a operação de enlatamento teve origem na França, por volta de 1790. Nesta época, a França estava em guerra e, em consequência, enfrentava problemas com a alimentação de sua população. Em suas batalhas, Napoleão perdia mais soldados devido à má alimentação do que em combate. O Governo Francês fazia grandes esforços para promover a indústria e a agricultura. A Sociedade para o Encorajamento da Indústria Nacional e a Sociedade da Agricultura lançaram apelos para obter informações sobre a preservação de alimentos (**BITTING, 1937**). Nicolas Appert, em 1800, estudando o problema da conservação de alimentos, observou que um alimento aquecido em recipientes fechados era preservado por muito mais tempo se ele não fosse aberto durante esse período. Appert recebeu do Governo Francês o prêmio de 12.000 francos para desenvolver seu processo de conservação, que consistia nas seguintes etapas (**APPERT, 1810** apud **LEONHARDT, 2003**):

- a) Preenchimento das garrafas com a matéria-prima alimentar a ser preservada;
- b) Fechamento cuidadoso das garrafas;
- c) Aquecimento, sob a ação de um banho de água em ebulição, das garrafas em intervalos de tempo diferentes, que dependia do produto alimentício considerado; e
- d) Resfriamento das garrafas.

A pesquisa de Appert iniciou-se por volta de 1795 e somente após sete ou oito anos de trabalho árduo, é que foi verificado o sucesso de seu método. Através da experimentação constante, Appert estabeleceu o tempo de permanência no banho de água em ebulição para cada tipo de alimento.

Teixeira & Balaban (1996) complementam as informações históricas disponíveis sobre este tipo de processamento, comentando que as perdas de alimentos por degradação não era o único problema enfrentado pela indústria de alimentos. O combate ao microrganismo *Clostridium botulinum*, que produz uma toxina letal para o ser humano, e que se desenvolve normalmente em alimentos que apresentem baixa acidez foi o grande responsável pelo desenvolvimento tecnológico verificado nos processos de fabricação usados pela indústria alimentícia nas décadas de 20 e de 30.

2.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE ALIMENTOS ENLATADOS: ESTERILIZAÇÃO

A inativação de microrganismos presentes em alimentos enlatados por meio do emprego do calor como agente de conservação é uma operação unitária fundamental na indústria de alimentos (**TOLEDO, 1994**).

Qualquer que seja a denominação utilizada, o tratamento térmico tem uma única finalidade: destruir, com uma probabilidade de falha conhecida, aqueles microrganismos prejudiciais sob o ponto de vista sanitário e/ou que causem deteriorações que influam diretamente na estabilidade do alimento (**LEONHARDT, 2003**).

A operação unitária que emprega o calor como agente de conservação e que apresenta interesse para o presente trabalho é denominada de **esterilização**. Num conceito mais restrito, a operação de esterilização resulta na ausência de microrganismos viáveis, isto é que possam sobreviver (mesmo de forma vegetativa, como por exemplo, esporos) ao tratamento térmico imposto, no produto alimentício. Assim sendo, este produto poderia ser armazenado por tempo indefinido e nenhum dano ao produto alimentício, causado por atividade microbiana, poderia ocorrer. Os esporos, contudo, podem sobreviver a temperaturas muito mais elevadas do que as células vegetativas. Assim sendo, eles seriam o objetivo principal da esterilização. Quando eles fossem destruídos, não mais existiriam células vegetativas vivas no produto alimentício (**HOLDSWORTH & SIMPSON, 2016**).

O termo **esterilização**, no contexto que é utilizado neste trabalho, refere-se à esterilização comercial do alimento enlatado. Esta é definida como a condição na qual os microrganismos que causam doenças e/ou aqueles capazes de se desenvolver num produto

alimentício quando armazenado e/ou distribuído em condições de ausência de refrigeração, são destruídos (TOLEDO, 1994).

Teixeira & Balaban (1996) apresentam o seguinte exemplo para ilustrar o conceito de esterilização comercial: se um esporo muito resistente necessita de temperatura na faixa de 65°C a 71°C para germinar e, assim, causar danos ao produto alimentício e este nunca for armazenado à temperatura de 65°C (ou superior) por qualquer período de tempo, então, mesmo se os esporos daquele organismo não forem eliminados pelo processamento térmico, não haverá riscos de deterioração do produto alimentício em “condições normais de armazenamento”. Este fato significa que podem existir alguns microrganismos não-patogênicos, dormentes, no produto alimentício; mas, as condições ambientes são tais que eles não podem se reproduzir.

A operação de esterilização é a mais importante do processo de enlatamento, podendo ser realizada em equipamentos que operem em regime contínuo ou descontínuo. Fundamentalmente, cinco são os fatores que controlam esta operação (**TEIXEIRA & BALABAN, 1996**):

- a) Natureza do produto alimentício: pH, potencial redox, nível de oxigênio presente etc.;
- b) Condições de armazenamento após o processamento térmico do produto alimentício;
- c) Resistência térmica dos microrganismos ou esporos alvo da destruição;
- d) Características de transferência de calor do produto alimentício: condutividade térmica, viscosidade, meio de aquecimento, modo de transferência de calor, tamanho e material de construção da embalagem etc.; e
- e) Número inicial de microrganismos.

Neste trabalho é estudada a esterilização de alimentos em vasos de pressão denominados autoclaves. Estas podem ser estacionárias ou rotativas, verticais ou horizontais. No desenvolvimento desta dissertação, foi considerada uma autoclave estacionária (isto é, sem sistema de agitação), vertical e de operação descontínua (**GEDRAITE & LEONHARDT, 1997**).

2.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE ALIMENTOS ENLATADOS: TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PRODUTO ALIMENTÍCIO

Quando se esteriliza um produto alimentício contido em embalagem fechada, observa-se que a sua temperatura interna varia com o tempo de aquecimento. A letalidade causada aos microrganismos indesejáveis pode então ser calculada usando-se o **método geral**, que se baseia na integração gráfica da curva de letalidade em função do tempo ou o **método baseado em fórmulas**, o qual usa, numa equação, os valores tabulados dos parâmetros e previamente calculados para se determinar o tempo de processamento requerido ou a letalidade oferecida pelo processamento térmico. Os problemas em cálculos de processamento térmico podem envolver tanto a determinação experimental do tempo e da temperatura do processamento necessários para se alcançar uma letalidade pré-estabelecida como o cálculo teórico do tempo e da temperatura de processo necessários (**HOLDSWORTH & SIMPSON, 2016**); (**DEAK & MOHÁCKSI-FARKAS, 2023**).

A equação que governa a transferência de calor para um corpo cilíndrico sólido, de altura H e raio R , com difusividade térmica constante é a segunda lei de transferência de calor de Fourier, dada pela equação diferencial a derivadas parciais apresentada na **Equação (2.1)**.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (2.1)$$

Na qual:

- T = temperatura do corpo;
- t = tempo de processamento;
- r = cota na direção radial;
- y = cota na direção axial; e
- α = difusividade térmica do alimento

Neste trabalho a **Equação (2.1)** foi resolvida numericamente, por meio do emprego de modelo matemático computacional. O modelo matemático foi desenvolvido tomando-se por base o emprego das equações de conservação de energia aplicadas a elementos de volume obtidos a partir da discretização do conjunto embalagem/produto alimentício em um

número finito de elementos de volume, supostos isotérmicos (BASTOS, 1994); (Zhu *et al.*, 2022); (Gontijo *et al.*, 2021). A discretização é apresentada no Anexo I.

2.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTROLE REGULATÓRIO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS

Para assegurar a esterilidade de alimentos enlatados, é essencial que o processamento térmico sofra um rígido controle toda vez que ele for utilizado. Este controle é executado através do emprego da malha de controle por realimentação da temperatura da autoclave. Esta malha de controle apresenta como característica fundamental a medição da variável a ser controlada e a sua comparação com o valor desejado (isto é, o *set point*). Caso exista desvio entre os dois valores, o controlador executa o ajuste de alguma variável relacionada com o processo e que afete a variável controlada de forma a mantê-la no valor desejado (isto é, a variável manipulada) (STEPHANOPOULOS, 1984); (BERTO & VITALI, 2008).

Este tipo simples de sistema de controle, geralmente utilizado com dispositivos de controle e/ou registro de temperatura tem sido, desde há muito tempo, aplicado nos processamentos térmicos de alimentos enlatados na indústria alimentícia, apresentando desempenho satisfatório sob condições normais de operação. Contudo, em situações de anormalidade, nas quais a quantidade de vapor de água suprida seja insuficiente para manter a temperatura desejada, intermitentemente ou não, resultarão desvios no processo. Poder-se-ia considerar o uso de dispositivos de alarme agregados ao sistema de controle da autoclave, para avisar o operador que está ocorrendo um desvio; ainda assim, a ação corretiva requereria a mudança para o modo manual de operação, a fim de se eliminar o distúrbio. A grande dificuldade é definir qual a ação corretiva a ser tomada (FASTAG *et al.*, 1996); (GONTIJO *et al.*, 2022).

Segundo Larousse & Brown (1997), alguns fabricantes elaboraram um conjunto de instruções aos operadores de autoclaves explicando quais seriam as ações corretivas a serem executadas, com base em estudos de penetração de calor no produto alimentício, na vigência de diversos tipos de desvios verificados. Estes estudos são caros, demorados e requerem a disponibilização de conhecimento e recursos tecnológicos. Dado que estes pré-requisitos nem sempre se encontram disponíveis, optou-se por tentar resolver este problema por meio de um sistema de controle que consiga detectar os menores desvios que possam ocorrer nas condições

do processo – mesmo durante curtos períodos – e executar a ação corretiva necessária imediatamente, dispensando a intervenção manual do operador no controle da autoclave.

2.5 - ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS

De acordo com **Holdsworth & Simpson (2016)**, a previsão da temperatura do produto a partir da temperatura do meio de aquecimento/resfriamento é a abordagem preferida na prática; contudo, ela requer o conhecimento de um modelo matemático que possa descrever com precisão a distribuição de temperaturas em regime transiente para o produto alimentício. A vantagem desta abordagem é que ela dispensa a instalação de unidades de teste para se medir a temperatura do produto, podendo modelar e controlar tanto o processo contínuo como o por bateladas. Dentre as desvantagens, pode-se citar, com especial destaque, o fato de ser necessário se conhecer o modo de transferência de calor, bem como as propriedades térmicas e físicas relevantes para cada produto e para cada tipo e geometria de embalagem.

Larousse & Brown (1997) afirmam, também, que os primeiros exemplos de sistemas de controle baseados em modelos matemáticos eram analógicos e que com o desenvolvimento dos microcomputadores, que apresentavam capacidade de processamento de informações necessárias para executar os modelos em tempo real, houve a migração destes sistemas analógicos para sistemas digitais de controle. O controle do processo estava baseado na predição da mudança de temperatura no centro do produto alimentício - num cilindro de dimensões finitas - a partir do qual a letalidade acumulada (F_0) era calculada. Quando a letalidade pré-determinada era alcançada, o resfriamento tinha início. Este tipo de controle era referenciado como “derived-value control”. Neste sistema de controle, a contribuição da etapa de resfriamento para a determinação do valor final de F_0 não era considerada. Reconheceu-se, posteriormente, que seria executado um controle mais preciso se este fosse baseado no valor de F_0 total, incluindo a etapa de resfriamento. Este sistema requeria a predição da contribuição da fase de resfriamento, antes do início dela. Este método de controle é frequentemente denominado de **controle antecipatório**.

Teixeira et al. (1969a,b) desenvolveram um modelo matemático para simulação computacional da evolução da temperatura em produto alimentício sólido, com propriedades térmicas constantes, acondicionado no interior de embalagem cilíndrica, aquecido pelo mecanismo da condução de calor.

Teixeira, Zinsmeister e Zahradnik (1975) usaram o modelo citado no parágrafo anterior para simular o processamento térmico de alimento enlatado, com a finalidade de prever o seu efeito sobre o nível de retenção de tiamina no produto alimentício, quando submetido a diferentes temperaturas de esterilização e que produziam o mesmo nível de esterilização. Os autores observaram que os processamentos térmicos que resultaram no mais alto nível de retenção da tiamina, pelo produto alimentício, parecem favorecer a configuração geral em que a temperatura da superfície da embalagem é gradualmente elevada - do limite inferior ao limite superior - durante um intervalo de tempo aproximadamente igual à metade do tempo de processamento, seguido por uma diminuição gradual desta até a temperatura na qual o resfriamento deve ser iniciado.

Teixeira & Manson (1982) propuseram um algoritmo computacional para o controle da operação de autoclave descontínua com a correção dos desvios de processo *online*. Os autores implementaram o algoritmo num computador digital de pequeno porte, que podia ser programado para executar uma sequência específica de funções de controle, bem como para ler e interpretar os sinais de entrada provenientes de elementos sensores, tais como: temperaturas, pressões e nível de água no interior da autoclave. Adicionalmente, este computador era responsável pela tomada de decisões e pelo envio de sinais de comando para a autoclave. Uma característica importante deste tipo de sistema de controle é a monitoração contínua dos sinais provenientes dos sensores instalados na autoclave. Na ocorrência de um desvio de processo, um sistema de alarme alerta o operador sobre a necessidade de se executar alguma ação corretiva, podendo, imediatamente, imprimir um registro de tempos e temperaturas para uso na avaliação do processamento térmico em curso.

Datta et al. (1986) revisaram o algoritmo computacional originalmente desenvolvido por **Teixeira & Manson (1982)**, incluindo a contribuição da etapa de resfriamento na determinação da letalidade causada pelo processamento térmico ao microrganismo indesejado. É importante que se ressalte o fato de que na ocorrência de um desvio no processo, o algoritmo desenvolvido por **Teixeira & Manson (1982)** estimava o novo valor para o tempo de aquecimento por intermédio de simulação, considerando que a temperatura da autoclave permanecia invariável até o final daquele processamento. Essa hipótese não era necessariamente verdadeira, pois quaisquer flutuações posteriores na temperatura da autoclave tornariam este valor do tempo de aquecimento inválido, requerendo que novas simulações - que demandam muito tempo de processamento computacional - fossem executadas. Ao invés de

procurar determinar qual seria o novo valor do tempo de aquecimento necessário para compensar um determinado desvio no processo, os autores propuseram a monitoração do valor de $F_0(t)$ em tempo real, com base na evolução das temperaturas no interior do alimento e da autoclave. Os autores afirmam, também, que a contribuição da etapa de resfriamento ao valor de F_0 não deve ser desconsiderada para um produto alimentício que é aquecido por condução. Segundo eles, dependendo do valor da temperatura do produto alimentício no centro da embalagem, quando do início do resfriamento, do tamanho da embalagem e de outros fatores envolvidos no processo de aquecimento por condução, o valor desta contribuição pode alcançar quarenta por cento do valor de F_0 total.

Datta et al. (1986) propõem que o cálculo estimativo do valor da letalidade causada pelo processo de resfriamento possa ser feito por meio da simulação do ciclo de resfriamento, assumindo-se que a temperatura da água de resfriamento no interior da autoclave seja constante. O algoritmo proposto pelos autores realiza esta simulação - em tempo real - ao mesmo tempo em que o sistema de controle pode estar executando outra(s) instrução(ões).

Rodrigues et al. (1998) realizaram estudo comparativo entre as técnicas numéricas de resolução do problema de transferência de calor em produtos alimentícios enlatados, comparando os métodos de Diferenças Finitas e de Runge-Kutta-Gill de 4ª ordem. Os autores estudaram a resolução do modelo matemático de transporte de calor em regime transiente bidimensional (em coordenadas cilíndricas) e unidimensional (em coordenadas esféricas), observando a rapidez e a precisão do método de integração em comparação aos perfis reais de tempo e de temperatura, incluindo os desvios do processo. Os autores usaram simulantes de alimentos com características de aquecimento por condução e por convecção.

Akterian (1999) estudou uma estratégia de controle *online* para compensar desvios aleatórios na temperatura do meio de aquecimento durante a realização de processos descontínuos de esterilização, baseada no uso de conjuntos de funções sensibilidade. Segundo o autor, este método de controle, que também envolve a predição da temperatura no centro do produto alimentício, é simples e permite uma implementação simples e barata em microcontroladores.

Varga et al. (2002) estudaram o impacto da variação da temperatura sobre a distribuição da letalidade imposta a um microrganismo de referência, usando para tal finalidade duas

autoclaves industriais estacionárias. Para tanto, calcularam a letalidade considerando a temperatura no centro do produto alimentício (produto destinado ao segmento de nutrição de animais de estimação). Os autores mediram esta temperatura experimentalmente e, também, avaliaram-na por meio de simulação computacional usando um modelo matemático de transporte de calor por condução. Os autores sugerem, com base em análise estatística adequada, que os resultados obtidos para as letalidades calculadas, tendo por base as temperaturas anteriormente citadas, podem ser considerados semelhantes.

2.8 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZADA

A busca por trabalhos recentes relacionados com a realização de experimentos envolvendo o processamento térmico de produtos enlatados relevou que existem vários trabalhos abordando o tema. Contudo, a apresentação das pesquisas realizadas sobre o tema na própria Faculdade de Engenharia Química da UFU ainda carece de incentivo, sendo que o desenvolvimento de trabalhos nesta área do conhecimento poderia ajudar a suprir parcialmente esta lacuna. Importante destacar que o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da UFU poderia igualmente se beneficiar do desenvolvimento deste trabalho.

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura, onde encontram-se reunidas informações relativas ao desenvolvimento e aplicações de métodos inversos para a determinação de propriedades térmicas dos mais diversos alimentos.

O interesse nas propriedades de transporte de alimentos (condutividade térmica, capacidade de calor, densidade, massa e difusividade térmica e coeficiente de transferência de calor e massa) surge devido à importância de prever as taxas de transferência de calor durante o processamento, preservação e otimização de equipamentos de processamento (**GERMER, 1997**).

O grande aumento de estudos que utilizam métodos inversos se deve a disponibilidade de computadores de alta velocidade, memória de baixo custo e softwares desenvolvidos, que auxiliam os pesquisadores no gerenciamento de recursos de maneira eficiente e econômica, em comparação com técnicas experimentais de tentativa e erro (**MOHAMED, 2010**).

Existem vários métodos que medem diretamente as propriedades térmicas dos alimentos, a maioria deles precisa de instrumentação relativamente complexa ou montagens experimentais e exige um conhecimento dos fenômenos térmicos.

No problema direto, o principal objetivo é determinar a temperatura do alimento em função do tempo e da posição, considerando que todas as propriedades térmicas são conhecidas. No problema inverso, as propriedades termofísicas são desconhecidas, enquanto tudo o mais é conhecido. O problema inverso depende de medições de temperatura tomadas em um local e tempo especificado. Os dados de temperatura medidos são considerados conhecidos por simulação ou experimento. O problema inverso é muito sensível a erros aleatórios inerentes às temperaturas medidas, portanto, técnicas especiais podem ser necessárias para resolver o problema. **(EBRAHIMIFAKHAR; YUILL, 2020)**

Os métodos inversos têm amplas aplicações em óptica, radar, acústica, teoria da comunicação, processamento de sinais, imagens médicas, visão computacional, geofísica, oceanografia, astronomia, sensoriamento remoto, processamento de linguagem natural, aprendizado de máquina, testes não destrutivos e muitos outros campos **(BARATAUD *et al.*, 1996); (BAEK & LEE, 2006); (HASHIN & MONTEIRO, 2002); (LORINCZI *et al.*, 2014); (QIAN & LI, 2008); (RAPPAZ *et al.*, 1995); (ŠIMŮNEK *et al.*, 1998)**

Os coeficientes de sensibilidade são de extrema importância na análise de problemas inversos. Valores pequenos de coeficientes de sensibilidade mostram que grandes mudanças no parâmetro desconhecido produzem pequenas mudanças na temperatura estimada. Seria difícil, até talvez impossível, estimar o parâmetro desconhecido. Grandes coeficientes de sensibilidade para cada parâmetro desconhecido e coeficientes de sensibilidade linearmente independentes para diferentes parâmetros desconhecidos é o desejável. Em problemas inversos envolvendo parâmetros desconhecidos com diferentes ordens de magnitude, um coeficiente de sensibilidade escalonado em quantidade é o ideal, uma vez que permite a comparação dos coeficientes de sensibilidade para diferentes parâmetros **(BECK & ARNOLD, 1977); (SILVA *et al.*, 2020).**

O procedimento de otimização proposto pelo método de Evolução Diferencial foi aplicado com sucesso por **(MARIANI *et al.*, 2008)** na determinação da difusividade térmica aparente da banana, sendo propriedades dependentes do teor de umidade e / ou temperatura média na seção radial durante o processo de secagem. Uma análise estatística não mostra

diferenças significativas entre os perfis de temperatura previstos e experimentais no centro térmico, o procedimento foi validado com 6 experimentos conduzidos de formas diferentes, mas que apresentaram o mesmo valor para o algoritmo desenvolvido e os valores experimentais.

Mohamed (2009), usou o método de estimativa de parâmetro sequencial não linear baseado na técnica de minimização de Gauss para estimar simultaneamente a capacidade de calor volumétrica e condutividade térmica usando medições de temperatura transiente para um alimento de condução unidimensional, uma análise dos coeficientes de sensibilidade foi feita, sendo determinado que a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica são linearmente independentes. Foi mostrado que quanto mais próximo o sensor está da superfície de aquecimento, mais precisa é a estimativa dos parâmetros.

Silva et al. (2010), propuseram um algoritmo de otimização acoplado à solução analítica da equação de difusão com condição de contorno sendo a transferência convectiva de massa na casca (condição de contorno de Cauchy). O método determina a difusividade efetiva e o coeficiente de transferência de massa convectiva na secagem em camada delgada para produtos com geometria cilíndrica, e foi aplicado à cinética de secagem de arroz em casca.

O código-fonte foi compilado pela Compaq Visual Fortran (CVF) 6.6.0 Professional Edition, utilizando a opção de programação *QuickWin Application* na plataforma Windows XP™, o código varre o número de Biot de 0 a 200, (zero corresponde a nenhuma transferência de massa e 200 corresponde a transferência de massa no equilíbrio), utilizando o método inverso e os dados da literatura, a raiz do número de Biot para aqueles determinados dados experimentais é encontrada, e conseqüentemente a difusividade efetiva e o coeficiente de transferência de massa, sendo assim, não existe a necessidade de chutar um valor inicial, o que normalmente é necessário em outros trabalhos de métodos inversos. **(SILVA et al., 2010)**

O trabalho mostra que indicadores estatísticos obtidos usando a condição de contorno convectiva são significativamente melhores do que aqueles derivados da condição de contorno de equilíbrio, ou seja, a condição de equilíbrio é uma aproximação aceitável do processo, o tempo de execução foi de 18 segundos e os dados encontrados foram os mesmos encontrados na literatura. **(SILVA et al., 2010)**

CZÉL *et al.* (2014) utilizaram rede neural artificial para o problema de condução de calor inversa para determinar simultaneamente a capacidade volumétrica de calor dependente da temperatura e a função de condutividade térmica de um sólido. O problema inverso foi definido de acordo com a avaliação do método de medição de propriedades termofísicas BICOND. Foram usados os históricos de temperatura transitória medida de dois sensores. O problema inverso foi resolvido por rede neural *feedforward* multicamadas treinada por algoritmo de retropropagação (BP) e rede neural do tipo função de base radial (RBF) aplicando a abordagem de mapeamento de história inteira.

Funções das propriedades térmicas dependentes da temperatura são encontradas, sem a necessidade de informações prévias sobre a natureza das funções. O treinamento das redes neurais é difícil e longo, apesar do treinamento ser demorado, a rede fornece saídas para certas entradas muito rapidamente no estágio de ativação, pois não precisa de nenhum processo iterativo. O tempo de CPU do treinamento foi significativamente menor no caso das redes RBF, o que pode tornar o tipo de rede RBF atraente. Por outro lado, as redes RBF necessitaram de mais amostras de treinamento em comparação com as redes BP, o que aumentou o tempo total necessário para realizar o treinamento. A melhor precisão da solução inversa foi fornecida por uma rede BP com resolução de dados de entrada aumentada (BP-2) no caso de entradas sem ruído e com ruído, com erro médio de 1,216%. Eles concluíram que a rede neural pode ser treinada em um tempo razoável de CPU e, após o treinamento, a solução do problema inverso leva apenas uma fração de segundo, pois a solução inversa é não iterativa. (**CZÉL *et al.*, 2014**)

Greiby *et al.* (2014) estimaram propriedades térmicas do bagaço de cereja dependentes da temperatura. O calorimétrico de varredura diferencial foi usado para estimar o calor específico. Amostras de bagaço de cereja azedo em diferentes teores de umidade foram enlatadas e aquecidas a em uma autoclave. Mínimos quadrados ordinários e métodos de estimação sequencial foram usados para estimar os parâmetros no MATLAB com Comsol. Os coeficientes de sensibilidade em escala são grandes e não correlacionados, o que significa que as propriedades térmicas podem ser estimadas separadamente e facilmente.

Comsol é um software comercial de elementos finitos, ele foi usado para gerar temperaturas centrais previstas, dadas as entradas de temperatura de superfície medida, tempo de aquecimento, e estimativa inicial da condutividade térmica do bagaço k_1 e k_2 . O calor específico aumentou com o teor de umidade e temperatura. A difusividade térmica aumentou

com a temperatura e diminuiu com o teor de umidade (de 25% para 70% de umidade). Com a estimativa sequencial, os parâmetros chegaram a um valor constante bem antes do término do experimento. (**GREIBY *et al.*, 2014**)

O módulo de otimização do Comsol é caracterizado por uma interface geral para computação de soluções ótimas. Qualquer entrada de modelo, suas propriedades de material, dimensões geométricas, formas de peças ou distribuição de material, pode ser tratada como uma variável de design e qualquer saída de modelo pode ser uma função objetivo. Por exemplo, o módulo de otimização pode ser usado para resolver problemas inversos, como estimativa de parâmetros, bem como sensibilidade e otimização dependentes de tempo. Existem dois algoritmos de otimização disponíveis no módulo de otimização: o SNOPT e o algoritmo de Levenberg – Marquardt. (**FABBRI *et al.*, 2014**)

O conhecimento dos coeficientes de difusividade mássica da água nos alimentos é um parâmetro físico muito importante para o projeto, modelagem e simulação de diferentes fábricas de alimentos e processos relacionados, como cozimento, secagem e amadurecimento. Infelizmente, valores específicos de difusividade de umidade não são facilmente encontrados na literatura, particularmente para alimentos processados. (**FABBRI *et al.*, 2014**)

Fabbri *et al.* (2014) determinaram a difusividade mássica da água no salame, biscoito e pão achatado, eles desenvolveram um método, baseado na inversão de modelos de elementos finitos, para estimar a difusividade da água em diferentes produtos alimentícios sólidos. A diferença entre os teores de umidade médios determinados experimentalmente e calculados pela equação de Fick foi minimizada. A efetividade da difusividade da umidade foi calculada pelo método inverso, o método Levenberg – Marquardt com a segunda ordem do método do gradiente numérico foi escolhido como o algoritmo de otimização. Utilizando u computador equipado com 24 CPU (Xeon5675 64 bits 3,07 GHz) e 24 GB de RAM, o tempo de cálculo foi de 7 – 10,6 – 15,4 – 10 min. para biscoitos, pão achatado e salame.

Mohamed (2015) investigou sobre a localização do ponto frio nos cálculos de letalidade do processamento térmico para alimentos enlatados aquecidos por condução, utilizando a abordagem de problema de condução de calor inversa (IHCP, em inglês) para modelar a transferência de calor para alimentos enlatados com *headspace* e usando um modelo unidimensional de condução de calor. O autor empregou um algoritmo de especificação de

função sequencial para estudar a transferência de calor na região do *headspace* da embalagem, realizando medições dos transientes de temperatura. O fluxo de calor foi estimado e usado para resolver o problema de condução direta de calor para os perfis de temperatura na direção axial, contemplando inclusive a posição do sensor. Desvios entre as temperaturas estimadas e as temperaturas medidas no sensor foram calculadas usando o critério da raiz do erro quadrático médio. De todos os tratamentos utilizados, um erro máximo de 0,29°C foi obtido para todo o período de medição do processamento térmico, o que está bem dentro do erro de medição do termopar. Segundo o autor, a excelente concordância entre as temperaturas medidas e calculadas na posição do sensor é uma indicação de uma estimativa precisa dos fluxos de calor e subsequente localização do ponto frio. Os resultados revelaram que o ponto frio é localizado a cerca de 59% da altura da embalagem que contém o alimento, medido a partir do fundo da mesma para os três níveis de *headspace* investigados (10%, 14% e 20%). Ainda de acordo com o autor, o resultado da pesquisa forneceu um guia útil para a localização precisa do ponto frio, quando coleta de dados de penetração de calor para alimentos aquecidos por condução com *headspace* predominantemente ocupado por vapor de água, permitindo garantir a segurança dos alimentos enlatados com base no cálculo preciso da letalidade do processo térmico.

Cornejo et al. (2016), estudaram, via simulação, usando o método dos volumes finitos, a capacidade de um método inverso para determinar simultaneamente a condutividade térmica [$k(T)$] e calor volumétrico específico aparente [$C(T)$] de alimentos na faixa de temperatura de congelamento (ou seja, do ponto de congelamento inicial até $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Além disso, as condições experimentais ideais foram exploradas. Como referência, foi utilizado o Tylose MH-1000, pois suas propriedades térmicas são bem conhecidas. Para a determinação simultânea da condutividade térmica e do calor específico volumétrico, é necessário que eles sejam linearmente independentes, o que é mostrado por **MENDONÇA et al. (2005)**.

Cornejo et al. (2016) validaram os parâmetros estimados gerando curvas experimentais de temperatura / tempo em diferentes condições e, em seguida, comparando essas curvas com as curvas geradas com os parâmetros estimados. Em seu trabalho, a validação foi realizada gerando dados modificando a espessura da amostra, analisando o efeito do número de curvas de congelamento, alterando as condições de congelamento de resfriamento normal, resfriamento rápido e resfriamento lento. Além disso, para validação dos parâmetros obtidos foram incluídas medidas de erro na curva de congelamento de cerca de 0,15°C. O método proposto foi considerado preciso e robusto, além de ser um método mais curto, único, simples

e barato, já que para a determinação do calor específico volumétrico pelo método direto, é necessária medição de entalpia.

Zhang et al. (2016) utilizaram o método inverso com um esquema de mínimos quadrados para determina as difusividades térmicas dependentes da temperatura de duas ligas (alumínio-Cobre e latão). Os valores de temperatura transitória necessários como entrada para o método inverso proposto foram registrados utilizando uma câmera de linha infravermelha durante o aquecimento ou resfriamento unilateral. Um aerogel transparente à radiação infravermelha foi usado como material de isolamento, garantindo que a condução de calor fosse essencialmente unidimensional. Perfis de temperatura ao longo das amostras são obtidos usando até 512 fotodiodos como sensores de temperatura.

Vários métodos consideram a difusividade térmica independente da temperatura, porem nestes casos, é necessário ter vários valores de difusividade térmica para pequenos intervalos de temperatura, sendo assim, a consideração da difusividade térmica dependente da temperatura na equação, torna possível a utilização da equação em um intervalo muito maior de temperatura. **(ZHANG et al., 2016)**

Usar vários termopares para medir o campo de temperaturas em uma amostra pode afetar a condução do calor, e conseqüentemente, a precisão da solução, sendo assim a utilização da câmera de linha infravermelha com 512 fotodiodos forneceu uma quantidade muito maior de temperaturas medidas ao longo do cilindro, eliminando-se o problema de má localização do sensor. Os calores específicos foram obtidos a partir do pacote de *software* termoquímico *FactSage* e o banco de dados SGTE 2011, combinando esses valores com as difusividades térmicas dependentes da temperatura de alumínio, cobre e latão. As condutividades térmicas foram obtidas e apresentaram valores coerentes com os publicados na literatura, demonstrando a consistência da pesquisa. A introdução de erros aleatório e independentes nas medidas de temperatura também foram estudadas, e concluiu-se que o modelo proposto é bastante eficaz. **(ZHANG et al., 2016).**

Muramatsu et al. (2017) estudaram um novo método de determinação não isotérmica e não linear de difusividade térmica para a medição do valor da difusividade térmica de alimentos de baixa umidade. As difusividades térmicas de cinco tipos de alimentos de baixa umidade (farinha de amêndoa, farinha de milho, farinha de trigo, calda de chocolate e manteiga

de amendoim) foram estimadas usando uma técnica inversa. As amostras foram enlatadas e aquecidas na superfície em banho-maria a cerca de 70°C. O problema de condução de calor transiente unidimensional para coordenadas radiais foi resolvido com um modelo de diferenças finitas. A difusividade térmica de cada uma das 5 amostras foi determinada pelos métodos de mínimos quadrados ordinários e estimativa sequencial, respectivamente. As temperaturas previstas e observadas combinaram bem, com resíduos máximos de 0,9°C. Os valores de difusividade térmica das amostras variaram de $9,8 \times 10^{-8}$ a $1,3 \times 10^{-7}$ m²/s. De acordo com os autores as vantagens deste método são que o dispositivo e o método de estimativa são simples, baratos, rápidos e podem lidar com grandes gradientes espaciais de temperatura, como aqueles experimentados durante o aquecimento de alimentos de baixa umidade. Os resultados obtidos neste estudo serão úteis no projeto de equipamentos e em cálculos para o processamento térmico de alimentos de baixa umidade.

O método inverso usando gradiente conjugado foi utilizado por **Ebrahimifakhar & Yuill (2020)** para estimar a densidade aparente, o calor específico e o teor de umidade inicial dos grãos de cereais na secagem em leito profundo, usando apenas medições de temperatura dos grãos como dados de entrada. O conhecimento das propriedades termofísicas dos grãos de cereais é essencial para a modelagem matemática e simulação de operações de processamento de grãos. No entanto, a medição das propriedades termofísicas dos grãos de cereais é muitas vezes difícil ou demorada devido à sua estrutura heterogênea variável. (**CORNEJO *et al.*, 2016**).

Ghatrehsamani *et al.* (2018) estudaram a difusão térmica ocorrida durante o aquecimento e resfriamento de produtos agrícolas. O processo de resfriamento envolveu a avaliação da penetração de calor com taxas especiais relevantes para a difusividade térmica de amostras. Neste estudo, a difusividade térmica do trigo (variedade: Sabalan, peso: 427/7 gr, MC: 9%db) e milho (variedade: Crossing 704, peso: 362/1 gr, MC: 8/07% db) foram medidos e comparados em quatro níveis diferentes de temperatura. Os autores verificaram que a difusividade térmica aumentou com o aumento da temperatura da superfície externa do cilindro. As difusividades térmicas mínima e máxima foram obtidas 1,268E-03, 2,924E-05, 0,862E-3 e 3,135E-5 para trigo e milho, respectivamente. Os resultados mostraram que a temperatura a alteração da difusividade foi muito maior para o trigo do que para o milho devido à alteração da temperatura da superfície externa.

Ebrahimifakhar & Yuill, (2020), analisaram o impacto da quantidade de nós na malha, e determinaram que 111 nós seriam suficientes. Eles demonstraram que os desvios padrões das estimativas aumentavam quando o sensor era posicionado em um ponto mais afastado do fundo do leito de grãos, sendo o ar de secagem alimentado na base do equipamento de teste. A estimativa com o sensor localizado na entrada de ar foi mais precisa, com o coeficiente de sensibilidade apresentando maior valor.

Na determinação simultânea das propriedades densidade aparente e capacidade calorífica, apenas as medições de temperaturas tomadas na entrada do ar de secagem convergiram. Todas essas informações demonstram que métodos inversos podem resultar em estimativas ruins das propriedades de interesse, a depender da localização dos sensores. **(EBRAHIMIFAKHAR & YUILL, 2020)**.

Simpson *et al.* (2020), estudaram o tema do processamento térmico de alimentos, buscando obter uma melhor compreensão do processamento térmico de alimentos baseado em perfis de temperatura da autoclave variáveis (VRTPs, em inglês). Os VRTPs foram avaliados com vistas a otimizar processos, seja garantindo alto nível de qualidade ou minimizando o tempo do processo operacional. Baseado nos resultados da pesquisa, os VRTPs podem melhorar a retenção de qualidade; porém a melhora não foi suficiente para ser detectável pelos consumidores e para justificar a implementação de VRTPs na indústria. Contudo, a pesquisa destes autores forneceu um guia preliminar para os processadores descobrirem oportunidades para VRTPs, por exemplo, aumento da produtividade reduzindo o tempo do processo operacional e consumo de energia.

Azar *et al.* (2020), estudaram a transferência de calor por condução na esterilização de enopado de aipo enlatado. Um modelo de dinâmica de fluidos computacional (CFD, em inglês) foi desenvolvido e validado para prever os perfis de temperatura e determinar a zona de aquecimento mais lento (SHZ) durante o processamento térmico. O perfil de temperatura foi obtido e registrado experimentalmente em um ponto onde o ponto térmico mais frio era esperado. Os modelos CFD foram validados contra dados experimentais. Os resultados do estudo mostraram que a SHZ estava localizada no centro geométrico das embalagens ($x = 5,00$, $y = 1,42$, $z = 6,75$ cm), e a temperatura atingida foi igual a $119,5^{\circ}\text{C}$. A raiz quadrada média do erro (RMSE) foi calculada e mostrou um bom ajuste entre os dois métodos (RMSE = 1,03). O índice de letalidade F_0 , calculado no centro geométrico da embalagem, foi estimado como sendo

13,19 min. Para otimização do processo, de acordo com os ingredientes do ensopado, especialmente carne, o índice de letalidade F_0 foi de cerca de 8 min. De acordo com os autores, o tempo de espera necessário diminuiu em 5,19 min e a parametrização do sistema de controle da autoclave foi reajustada.

Nayak *et al.* (2020) estudaram o emprego de rede neural (ANN) no processamento térmico de produtos alimentícios enlatados. Desde o seu início, a ANN tornou-se popular e também desempenha um papel fundamental no aprimoramento da tecnologia mais recente. Com o aumento do emprego da automação industrial e da Internet das Coisas, ficou muito simples coletar dados e monitorar desde a secagem, extrusão e esterilização de alimentos até a sua classificação com a finalidade de garantir a segurança e verificar a qualidade. Nos últimos anos, o uso de ANNs no processamento de alimentos está aumentando, pois os pesquisadores descobriram uma ampla possibilidade de resolução de muitos problemas complexos do mundo real em processamento de alimentos. Nesta linha, as técnicas de aprendizado profundo trouxeram uma nova perspectiva no contexto do paradigma de processamento inteligente de alimentos. Os autores analisaram os avanços do processamento de alimentos usando RNAs, que incluem a jornada detalhada do aprendizado superficial ao aprendizado profundo. De acordo com os autores, a fusão de tecnologia com a vanguarda do aprendizado de máquina, aprendizado profundo e processamento de imagens para aplicação em alimentos amplia o escopo de criação de novas dimensões e oportunidades de crescimento para cada inovação.

Gedraite *et al.* (2021) estudaram a determinação da difusividade térmica da proteína texturizada de soja (PTS) como uma função linear da temperatura a partir de resultados experimentais de temperatura obtidos do processo de esterilização da PTS acondicionada em embalagens metálicas de geometria cilíndrica em autoclave estacionária. A metodologia de determinação do valor da difusividade térmica da PTS consistiu em identificar os valores dos coeficientes linear e angular que definem a difusividade através da minimização da diferença entre os resultados experimentais de temperatura e a resposta do modelo matemático de difusão de calor baseado no método dos volumes finitos e na resolução de equações diferenciais por método de elevada precisão (alta ordem). Os resultados obtidos demonstram que o modelo de difusão de calor usado é capaz de descrever com precisão o comportamento da temperatura da PTS submetida ao processo de esterilização. Também foi observado que a difusividade térmica identificada no processo gera uma distribuição de temperatura que possui em média 0,4°C de diferença em relação aos valores experimentais.

Pandey et al. (2021) usaram dois métodos em seu trabalho, o fluxo de calor na condução de calor unidimensional – resolvido usando o método de especificação de função sequencial – e a condutividade térmica dependente da temperatura, estimada usando o método mais recente e avançado do gradiente de conjugado (CGM). Foi provado que o método de especificação de função sequencial recupera o fluxo de calor de contorno com bastante precisão para níveis de ruído de 1% e 2%. A adição de etapas de tempo futuras estabiliza o algoritmo, aumentando a precisão dos resultados desejados. O método do gradiente conjugado foi considerado rápido e preciso.

Castillo et al. (2021) caracterizaram um material isolante usando o *Amalgamated Reduced Order Modal Method* (AROMM) – Método de Redução Modal de Ordem Amalgamada, em tradução livre – acoplada a um procedimento inverso. Um único modelo de ordem reduzida fornece resultados precisos para materiais isolados 250 vezes mais rápido do que a modelização clássica de elementos finitos. Uma sonda do tipo fio quente clássica foi escolhida, pois permite que os experimentos ocorram em qualquer lugar, não se restringindo apenas a laboratórios. A discretização espacial foi realizada pelo Método dos Elementos Finitos (FEM), tendo sido realizado um estudo de sensibilidade dos parâmetros e demonstrado que a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica são linearmente independentes, sendo assim, essas propriedades térmicas foram determinadas para cinco materiais isolantes.

O método para realizar a minimização de função é um método estocástico com o nome de *Particle Swarm Optimization*. Em termos de condutividade térmica, o erro de identificação permanece abaixo de 1%, enquanto o erro para a capacidade térmica chega a 6% no seu máximo, a velocidade dos cálculos numéricos foi menor que 5 minutos, sendo assim, o trabalho é eficaz e rápido. (**CASTILLO et al., 2021**).

Zhu et al. (2022), estudaram um método unidimensional (1D) de posição aparente (AP) de solução numérica (APNS) para prever a evolução da temperatura no ponto de aquecimento mais lento (SHP) de alimentos enlatados em qualquer formato de recipiente durante o processamento em autoclave. Neste estudo, o método APNS foi implementado em um domínio computacional bidimensional (2D) em um cilindro condutor que fornece um contorno de AP para o SHP em vez de um único AP no método 1D existente, permitindo a seleção do AP ideal que poderia melhorar substancialmente a previsão da temperatura, dada a precisão do método APNS. De acordo com os autores, o método 2D foi implementado em uma ferramenta de

software baseada na web. Esta ferramenta forneceu uma previsão, considerada por aqueles autores como perfeita, de um perfil de temperatura simulado do produto alimentício enlatado aquecido por condução, em um recipiente em forma de cone truncado. Foram também obtidas previsões razoavelmente boas de perfis de temperatura do produto, medidos experimentalmente, para alimentos acondicionados em embalagens de diferentes formatos e submetidos à convecção natural ou convecção/condução mista em temperatura de aquecimento não constante.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a unidade experimental utilizada por **Gedraite (1999)** e que serviu de base para a realização deste trabalho, bem como a fundamentação adotada para a elaboração do modelamento matemático. A variável analisada foi a temperatura no ponto mais interno do conjunto embalagem/produto alimentício ensaiado, considerando o processo tipicamente usado em esterilização de produtos alimentícios acondicionados em embalagens metálicas de geometria cilíndrica.

3.1 – AUTOCLAVE ESTACIONÁRIA UTILIZADA

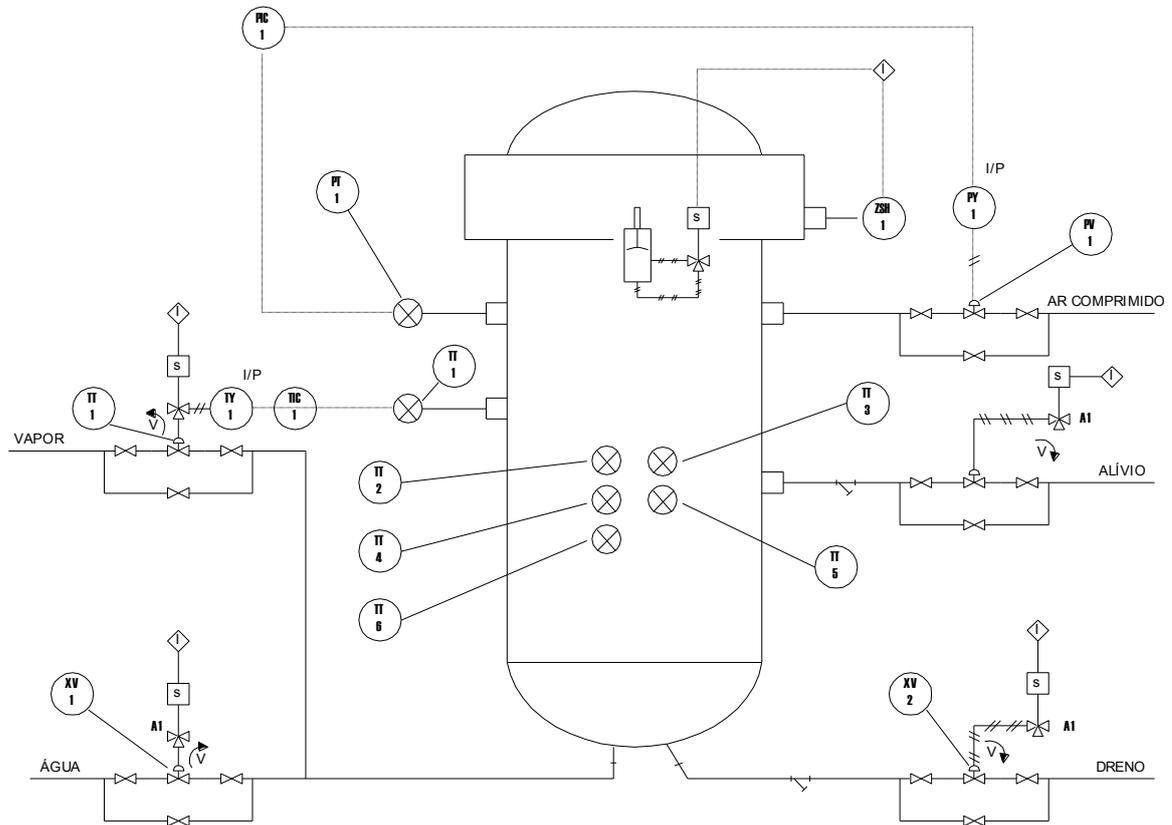
Com base em **Berteli *et al.* (2013)**, para que a esterilização seja bem-sucedida, é de fundamental importância o controle da temperatura à qual o alimento será exposto e do tempo de exposição àquela temperatura. A malha de controle de temperatura da autoclave empregada neste trabalho é mostrada na **Figura 3.1**. Ela irá atuar após o período de exaustão, que tem por finalidade principal eliminar o ar presente no interior da autoclave.

A cronometragem do período de exaustão e a do período de manutenção na temperatura necessária à letalidade dos microrganismos indesejáveis foi feita por meio de um controlador lógico programável. Uma vez alcançada a esterilização desejada, deve-se proceder ao resfriamento da autoclave por meio da injeção de água. Nesta etapa do processo é muito importante o controle da pressão no interior da autoclave, para se evitar que os recipientes que contenham o alimento sejam danificados. A malha de controle de pressão, também mostrada na **Figura 3.1**, atuava após o término da etapa de aquecimento, ajustando a vazão de ar comprimido que é alimentado à autoclave.

Tanto o controle da temperatura como o controle da pressão no interior da autoclave eram feitos por um controlador e indicador eletrônico microprocessado com capacidade para até quatro malhas de controle fechadas por realimentação.

O intertravamento da autoclave era feito por meio de um controlador lógico programável da marca Rockwell e tinha por finalidade principal impedir a colocação dela em operação caso a tampa não estivesse travada, além de impedir a abertura da tampa se a pressão interna for superior à pressão atmosférica.

Figura 3.1 – Fluxograma de engenharia de uma autoclave estacionária vertical



Fonte: elaboração própria.

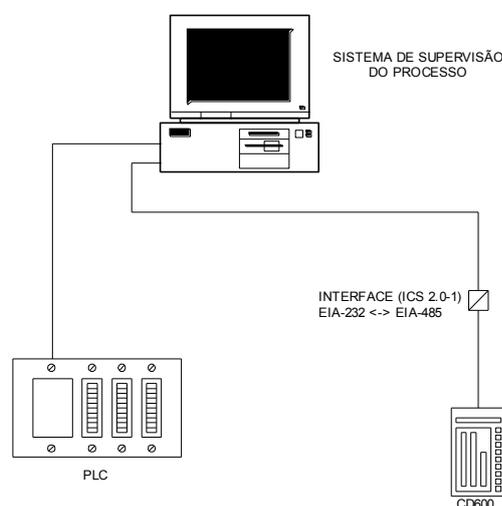
A autoclave estava equipada com sensores de temperatura adicionais, que podiam ou não ser acoplados às embalagens que continham o produto alimentício, para se poder avaliar experimentalmente a curva de penetração de calor no mesmo.

Para a medição da pressão e das temperaturas eram empregados transmissores eletrônicos microprocessados, que permitiam a medição dos respectivos valores com maior confiabilidade e maior precisão.

A autoclave utilizada por **Gedraite (1999)** nos experimentos realizados empregava um sistema de controle totalmente digital, baseado em um controlador e indicador eletrônico microprocessado acoplado a um controlador lógico programável interligados a um computador do tipo PC. Este computador executava um software supervisor que permitia o acompanhamento das condições de processo através de telas gráficas pré-configuradas. Na

Figura 3.2 é apresentado uma representação simplificada do *hardware* empregado pelo sistema de controle da autoclave vertical estacionária que foi objeto de estudo.

Figura 3.2: *Hardware* do sistema de controle da autoclave

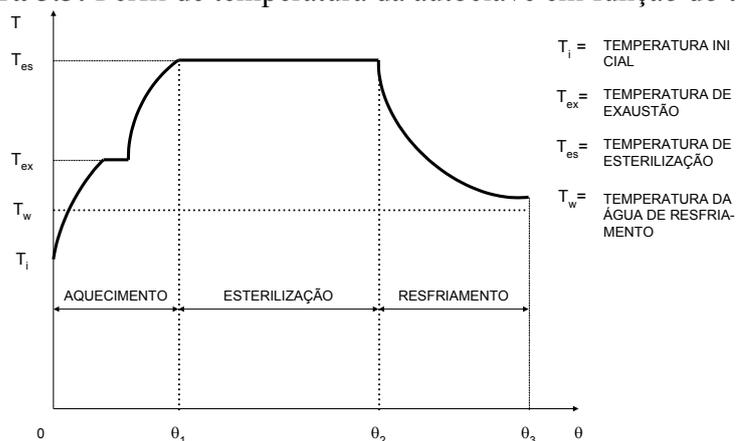


Fonte: Gedraite (1999)

3.2 – FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE

O sistema de controle da autoclave era responsável por gerar o perfil temporal de temperatura desejado para a autoclave. O perfil de temperatura típico para uma autoclave estacionária é mostrado na **Figura 3.3**. Com base nesta figura pode-se distinguir, fundamentalmente, três fases de operação da autoclave, a saber: aquecimento, esterilização e resfriamento. A fase de aquecimento compreende as etapas de exaustão e de aquecimento propriamente dito da autoclave. A etapa de exaustão tem por finalidade a eliminação do ar existente no interior da autoclave, enquanto a etapa de aquecimento visa atingir a temperatura pré-fixada para a esterilização.

A primeira atividade executada quando do início da operação da autoclave foi a etapa de exaustão (muitas vezes denominada de desaeração ou remoção do ar). Considerando que foi utilizado o vapor de água saturado como meio de transferência de calor, em razão do elevado valor do coeficiente individual de transferência de calor, era requerida a eliminação do ar presente no interior da autoclave. Quando a exaustão não é realizada de maneira correta, o ar remanescente pode se acumular ao redor das embalagens, agindo como isolante térmico e podendo provocar corrosão e, mesmo, danos à sua superfície.

Figura 3.3: Perfil de temperatura da autoclave em função do tempo

Fonte: LEONHARDT (2003)

Mesmo quando a autoclave se encontra com sua capacidade máxima de ocupação preenchida, uma boa parte do seu volume interno, geralmente localizada próximo ao domo superior, é preenchida pelo ar. Em autoclaves horizontais, após seu preenchimento, 80% do seu espaço se encontra ocupado pelo ar. Em autoclaves verticais 60% de seu volume é tomado pelo ar. Para remover todo este ar é necessário promover a circulação do vapor de água saturado, mantendo a válvula de exaustão aberta, pois o ar deve ser desalojado dos espaços formados entre os recipientes. Por outro lado, deve-se lembrar que, devido à superfície dos recipientes se encontrar em temperaturas inferiores à de saturação do vapor, ocorrerá uma condensação inicial. Por esta razão, a velocidade de escoamento do vapor de água deve ser elevada pelos seguintes motivos: (i)- para compensar a possível condensação do vapor ao redor das embalagens; (ii)- para eliminar o ar presente no interior da autoclave e (iii)- para que a temperatura de esterilização seja alcançada rapidamente (LEONHARDT, 2003).

Uma vez que a temperatura recomendada para a exaustão fosse atingida, devia-se manter a autoclave nesta temperatura pelo tempo necessário para se assegurar a eliminação do ar presente e, em seguida, providenciar para que a válvula de exaustão fosse fechada. Geralmente este intervalo de tempo é determinado experimentalmente e está baseado no fato de que o vapor de água saturado apresenta uma correspondência biunívoca entre os valores de pressão e de temperatura para uma determinada condição.

Assim sendo, com base nos valores da pressão lida no manômetro e da temperatura indicada no termômetro de indicação local, ambos instalados no corpo da autoclave, era verificado o atendimento a esta condição. Este procedimento não era uma indicação segura de

que todo ar havia sido eliminado; no entanto, enquanto a concordância entre os valores de pressão e de temperatura não fosse verificada, decidiu-se prosseguir com a desaeração.

Na sequência, o fornecimento de vapor de água saturado era mantido até que fosse alcançada a temperatura adequada para a esterilização do produto alimentício. A partir deste ponto, era o sistema de controle de temperatura que comandava a abertura ou o fechamento gradual da válvula de controle que era empregada para ajustar o valor da vazão de vapor de aquecimento. Ainda a partir deste mesmo ponto, tinha início a cronometragem do tempo de processamento, o que era feito pelo sistema de automação da autoclave. Esta era a fase de esterilização, durante a qual os seguintes cuidados eram adotados:

- 1) Manter a temperatura da autoclave 1°C acima da temperatura recomendada, para compensar eventuais flutuações em seu valor;
- 2) Verificar periodicamente, através do termômetro de indicação local, a temperatura da autoclave;
- 3) Verificar se o condensado formado no interior da autoclave estava escoando normalmente através da tubulação de dreno da autoclave, equipada com purgador de condensado; e
- 4) Acompanhar a duração da etapa de aquecimento e, uma vez completada, iniciar imediatamente a operação de resfriamento.

A etapa de resfriamento era conduzida na própria autoclave, sob pressão controlada. Esta pressão era mantida praticamente constante, empregando como variáveis manipuladas a vazão de água de resfriamento e a vazão de ar comprimido. Os seguintes procedimentos eram adotados:

- 1) Decorrido o tempo pré-fixado para a esterilização, interrompia-se o fornecimento de vapor de água e era fechada a válvula manual de bloqueio existente na tubulação de dreno de condensado. A pressão da autoclave era mantida cerca de 2 *psi* maior que a pressão de esterilização;
- 2) Atingida a pressão desejada, introduzia-se a água de resfriamento pela base até o completo preenchimento da autoclave. Quando a água de resfriamento chegava ao topo da autoclave, o sistema de automação fazia com que a válvula de extravasamento fosse gradualmente aberta, executando assim o controle da pressão, o que deve ser feito até que a temperatura do produto atingisse 60°C a 70°C. Deve-se ter em mente que, se o escoamento através da tubulação de extravasamento for bem controlado, a pressão de resfriamento pode ser mantida sem a introdução de ar comprimido;
- 3) Uma vez que a etapa (2) fosse atendida, devia-se iniciar o relaxamento da pressão, que dependia, fundamentalmente, do tipo de produto que estava sendo processado. Se o produto era aquecido por convecção, o relaxamento devia ser feito na base de 2 *psi/minuto*. Caso fosse aquecido por condução a redução de pressão deve ser mais lenta e a velocidade de relaxação deve ser de 1 *psi/minuto*. Dependendo do tipo de

produto, pode ser necessário manter a pressão de resfriamento por 10 a 15 minutos após a temperatura do produto ter atingido 60°C a 70°C; e

- 4) Uma vez atingida pressão manométrica nula, o produto já se encontrava praticamente frio. Porém, caso fosse necessário, devia-se prosseguir com o resfriamento, até que a temperatura do produto atingisse 35°C a 40°C. Este valor da temperatura final é conveniente para favorecer a evaporação da água que porventura fique retida na superfície das embalagens, quando são retiradas da autoclave.

Quando a pressão na operação necessitava fazer uso do ar comprimido o procedimento a ser adotado era praticamente o mesmo. Terminada a esterilização interrompia-se o fornecimento do vapor de água e fechava-se a válvula de dreno. Tinha início a injeção de ar comprimido pelo topo da autoclave, de modo a se obter a pressão desejada, após o que era iniciado o fornecimento de água de resfriamento pela base da autoclave. Naturalmente, a tendência da pressão era diminuir de valor, daí a necessidade de um controle adequado da pressão interna da autoclave. No instante em que a água atingia o topo da autoclave, o sistema de automação abre a válvula de dreno, mantendo a pressão estipulada para o resfriamento. O relaxamento da pressão, que era realizado de acordo com o tipo de produto, só devia ter início após a temperatura do produto ter atingido 60°C a 70°C.

A vazão de água de resfriamento, bem como sua circulação no interior da autoclave, devia satisfazer ao requisito de proporcionar o enchimento da autoclave em, no máximo, 5 minutos (LEONHARDT, 2003).

3.3 - MODELO MATEMÁTICO A PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS DESENVOLVIDO PARA O CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA

O modelo matemático a parâmetros distribuídos foi desenvolvido com base na nodalização proposta na **Fig. 3.4** que apresentação a discretização proposta para o conjunto embalagem/produto alimentício, a qual tomou por base 1/8 do volume total do referido conjunto. Os nós foram identificados por $Nó(i,j)$ sendo (i) a linha e (j) a coluna e x é o ponto central de cada nó.

Na **Fig. 3.5**, é apresentada uma visão mais detalhada dos nós e das condições de contorno que representam o sistema em estudo. Com base nela, pode-se visualizar de maneira mais efetiva o arranjo matricial que representa o conjunto embalagem/produto alimentício e as vizinhanças das superfícies que representam o volume de controle adotado. A quantidade de

nós escolhida foi a mínima necessária para permitir a representação coerente e adequada do comportamento da temperatura em cada um deles em função do tempo. A avaliação da influência do número de nós sobre o desempenho do modelo já havia sido previamente avaliada por **Gedraite (1999)**, tendo sido verificada por meio de análise de sensibilidade que mesmo para um número pequeno de nós, o modelo representa o comportamento real de maneira satisfatória.

Figura 3.4: Discretização proposta para o conjunto embalagem/produto alimentício

x	x	x	x	j = 1
x	x	x	x	j = 2
x	x	x	x	j = 3
x	x	x	x	j = 4
i=4	i=3	i=2	i=1	

Fonte: elaboração própria

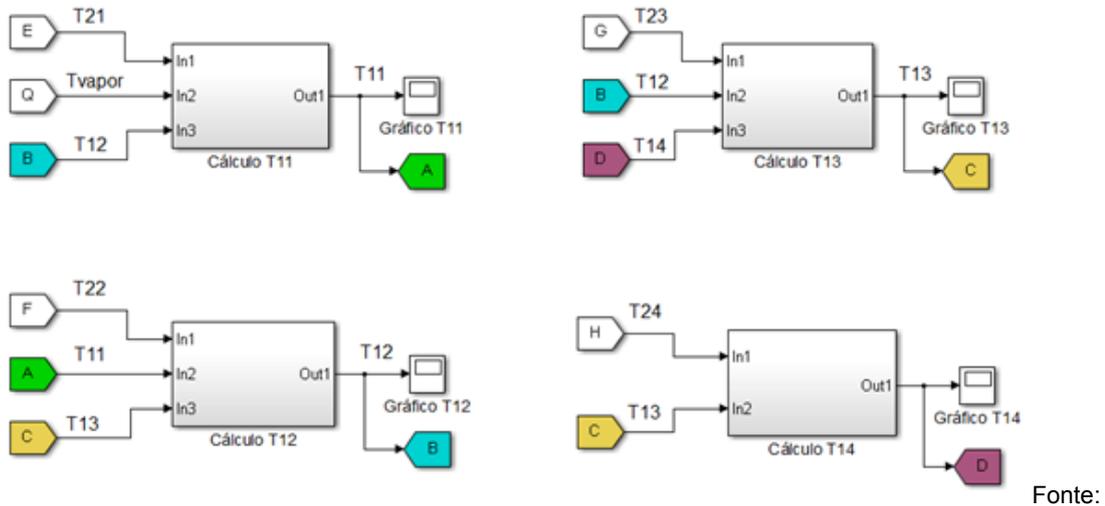
Figura 3.5: Discretização melhorada para o conjunto embalagem/produto alimentício

vapor					
vapor	(4,1)	(3,1)	(2,1)	(1,1)	Interior do produto
	(4,2)	(3,2)	(2,2)	(1,2)	
	(4,3)	(3,3)	(2,3)	(1,3)	
	(4,4)	(3,4)	(2,4)	(1,4)	
Interior do produto					

Fonte: elaboração própria

Os diagramas de simulação foram desenvolvidos no ambiente Simulink™ do *software* Matlab™. Na **Fig. 3.6** é apresentado o diagrama de simulação usado para o cálculo das temperaturas dos nós correspondentes à primeira coluna (mais interna) do sistema discretizado, a saber, nós (1,1) a (1,4).

Figura 3.6: Diagrama de simulação para o cálculo de T(1,1) a T(1,4)

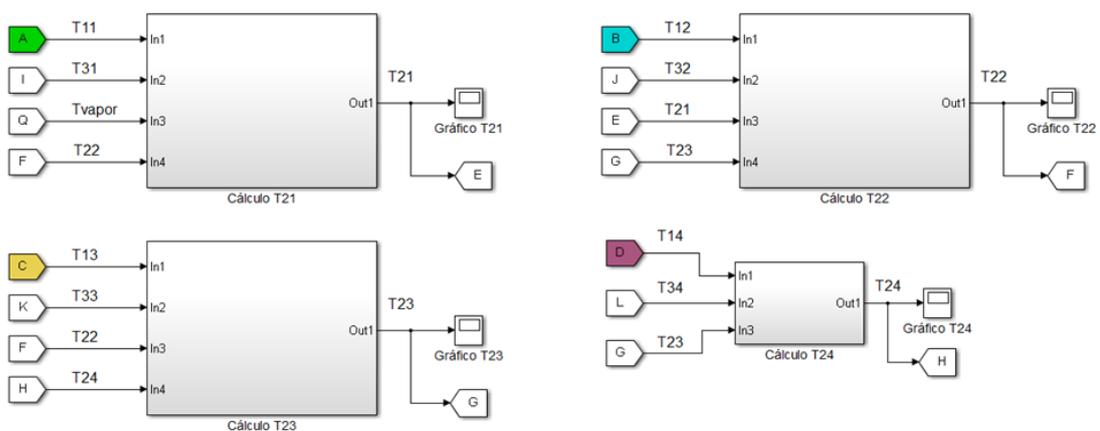


Fonte:

Fonte: elaboração própria

Na **Fig. 3.7** é apresentado o diagrama de simulação usado para o cálculo das temperaturas dos nós correspondentes à segunda coluna do sistema discretizado, a saber, nós (2,1) a (2,4).

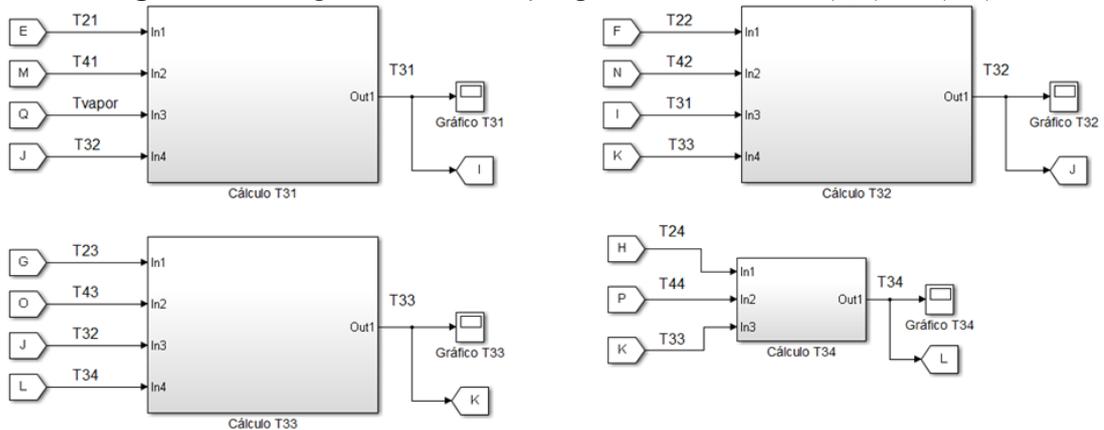
Figura 3.7: Diagrama de simulação para o cálculo de T(2,1) a T(2,4)



Fonte: elaboração própria

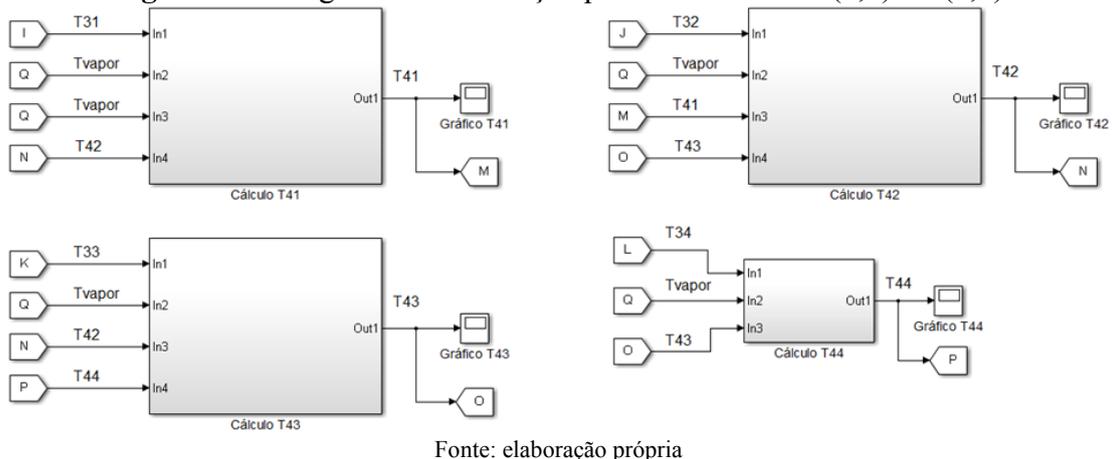
Na **Fig. 3.8** é apresentado o diagrama de simulação usado para o cálculo das temperaturas dos nós correspondentes à terceira coluna do sistema discretizado, a saber, nós (3,1) a (3,4).

Figura 3.8: Diagrama de simulação para o cálculo de T(3,1) a T(3,4)



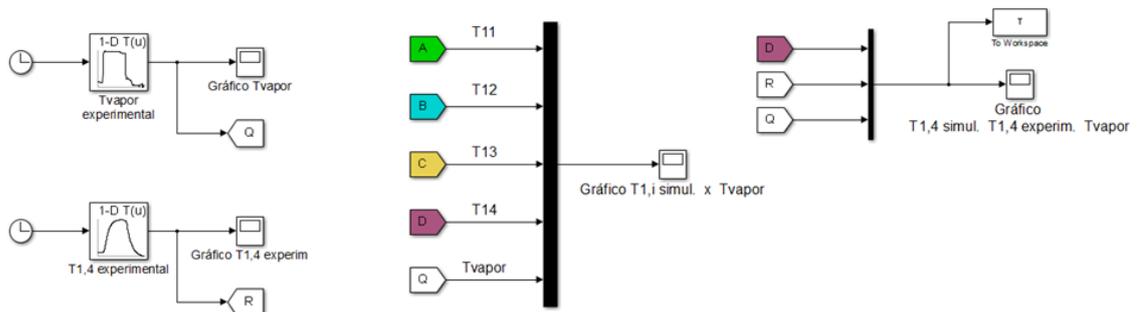
Na **Fig. 3.9** é apresentado o diagrama de simulação usado para o cálculo das temperaturas dos nós correspondentes à quarta coluna do sistema discretizado, a saber, nós (4,1) a (4,4).

Figura 3.9: Diagrama de simulação para o cálculo de T(4,1) a T(4,4)



Na **Fig. 3.10** é apresentado o diagrama de simulação usado para validar o comportamento das temperaturas simuladas em comparação com as experimentais dos nós correspondentes à primeira coluna do sistema discretizado, a saber, nós (1,1) a (1,4).

Figura 3.10: Diagrama de simulação para validação de T(1,1) a T(1,4)



Fonte: elaboração própria

3.4 – METODOLOGIA

Os valores experimentais de temperatura do produto alimentício estudado foram coletados por **Gedraite (1999)**, empregando a facilidade experimental anteriormente apresentada. Foi escolhido como produto o patê de alcachofra, devido a pouca disponibilidade de informação acerca do mesmo na literatura.

Foi elaborado o modelo matemático a parâmetros distribuídos com base na fundamentação teórica apresentada no capítulo 2 e detalhada no subitem 3.3 deste estudo. O modelo foi validado por comparação dos resultados obtidos nas simulações com os resultados experimentais. Foram testados diversos valores para o parâmetro difusividade térmica, tendo sido encontrado aquele que apresentou a menor diferença entre as temperaturas medida e simulada.

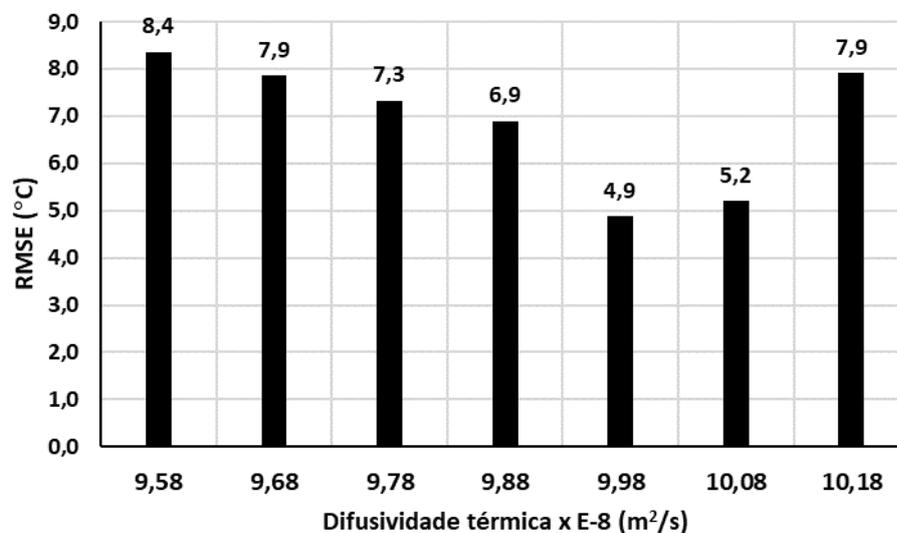
As simulações foram realizadas em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i5-10400F CPU @ 2.90GHz e 16,0 GB de memória RAM instalada, empregando sistema operacional de 64 bits e processador baseado em x64.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no experimento realizado por **Gedraite (1999)** com o protótipo de autoclave foram construídas as curvas de resposta da temperatura da autoclave e da temperatura do produto alimentício em estudo. O valor da difusividade térmica aparente do produto alimentício em estudo foi determinado com base na comparação entre a temperatura medida experimentalmente e a temperatura simulada, sendo o valor mais provável daquela propriedade de transporte de calor aquele que fornece a maior aproximação entre os valores medidos e simulados. Na **Figura 4.1** são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do procedimento citado.

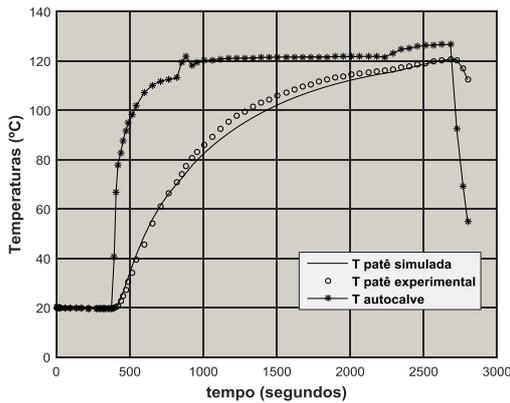
Foi utilizado o RMSE como critério de avaliação do ajuste da temperatura simulada ao respectivo comportamento experimental, para cada valor de difusividade térmica considerado, sendo os valores calculados de RMSE apresentados na **Figura 4.2**.

Figura 4.2: Valores calculados do RMSE

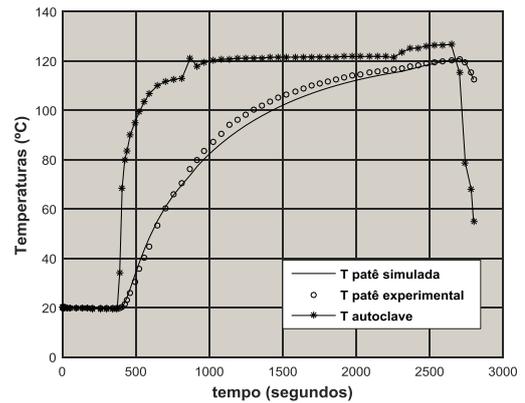


Fonte: autoria própria (2023)

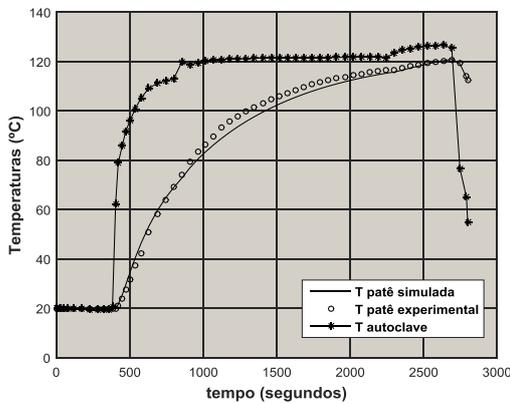
Com base nos gráficos apresentados na **Figura 4.1** se pode verificar que o comportamento da temperatura medida no experimento realizado por **Gedraite (1999)** apresentou valores ligeiramente maiores do que os valores simulados computacionalmente, particularmente entre os instantes $t = 1.000 \text{ segundos}$ e $t = 2.300 \text{ segundos}$. Este fato permite sugerir que o valor calculado da difusividade térmica seja dependente do valor da temperatura no interior do conjunto embalagem/produto alimentício.



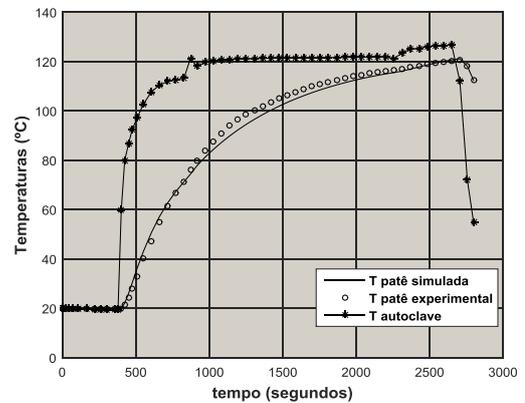
a) Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,58E-08 \text{ m}^2/\text{s}$)



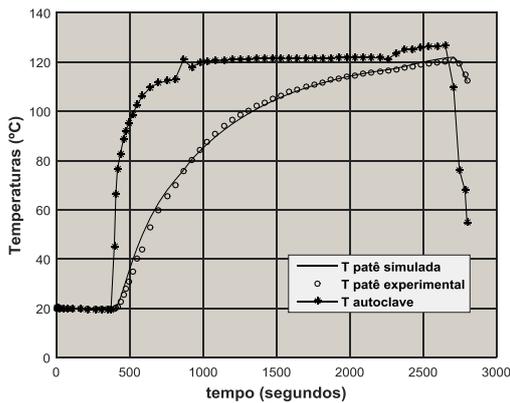
b) Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,68E-08 \text{ m}^2/\text{s}$)



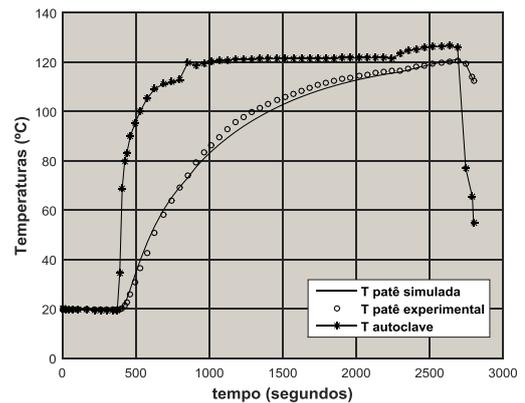
c) Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,78E-08 \text{ m}^2/\text{s}$)



d) Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,88E-08 \text{ m}^2/\text{s}$)



e) Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($9,98E-08 \text{ m}^2/\text{s}$)



f) Temperaturas da autoclave e do patê de alcachofra ($10,8E-08 \text{ m}^2/\text{s}$)

Figura 4.1: Resultado das simulações para diferentes valores de difusividade térmica

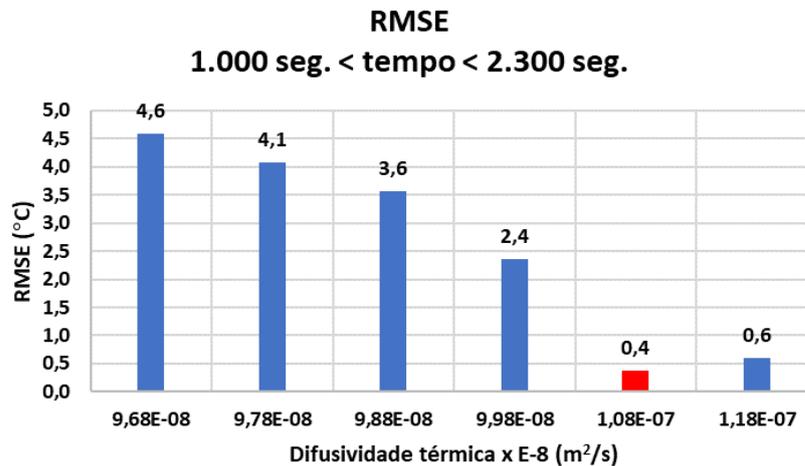
Fonte: autoria própria (2023)

Importante destacar que o valor do RMSE para os valores da temperatura correspondente à difusividade térmica igual a $9,98E-08 \text{ m}^2/\text{s}$ sugere que o erro médio absoluto

nos valores de temperatura é da ordem de 5°C, o que pode ser considerado bastante satisfatório levando em conta que a temperatura de letalidade para o microrganismo de referência é igual a 120°C.

De uma maneira geral, nas simulações realizadas, se pode perceber que os desvios mais perceptíveis entre a temperatura medida e a temperatura simulada se concentraram entre os instantes $t = 1.000$ segundos e $t = 2.300$ segundos. Neste intervalo de tempo, a temperatura do produto alimentício em estudo está compreendida entre 80°C e 110°C respectivamente. Assim, foi realizada uma análise de sensibilidade neste intervalo de tempo de modo a se quantificar o valor do RMSE correspondente. Os valores calculados estão apresentados na **Figura 4.3**.

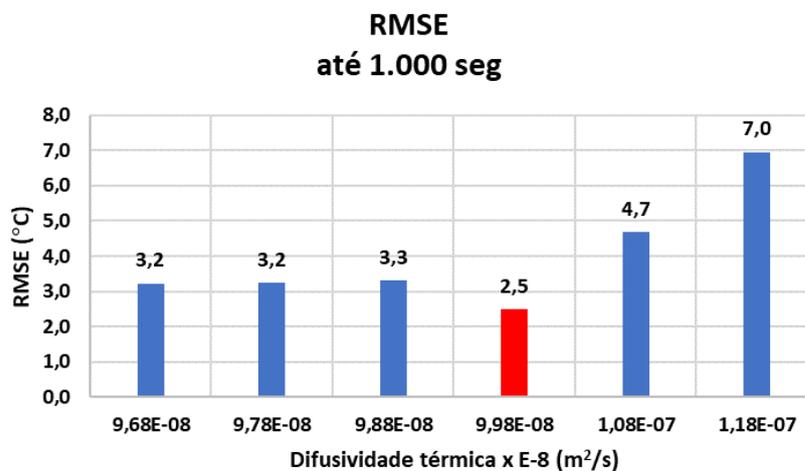
Figura 4.3: Valores parciais calculados do RMSE



Fonte: autoria própria (2023)

O menor valor do RMSE para o intervalo de tempo considerado foi verificado para o valor da difusividade térmica igual a **1,08E-07 m²/s**, muito próximo do valor de difusividade térmica considerado como o valor mais provável e igual a **9,98E-08 m²/s**. Apesar do fato constatado, o valor global do RMSE que correspondente ao valor médio global mais provável da difusividade térmica ainda pode ser considerado válido pois apresenta o menor valor de RMSE global.

Complementando a análise anteriormente realizada, se forem considerados os primeiros 1.000 segundos da etapa de aquecimento, pode-se verificar que o menor valor de RMSE calculado é aquele correspondente ao valor de difusividade térmica mais provável igual a **9,98E-08 m²/s**. Os valores calculados estão apresentados na **Figura 4.4**.

Figura 4.4: Valores parciais calculados do RMSE – aquecimento inicial

Fonte: autoria própria (2023)

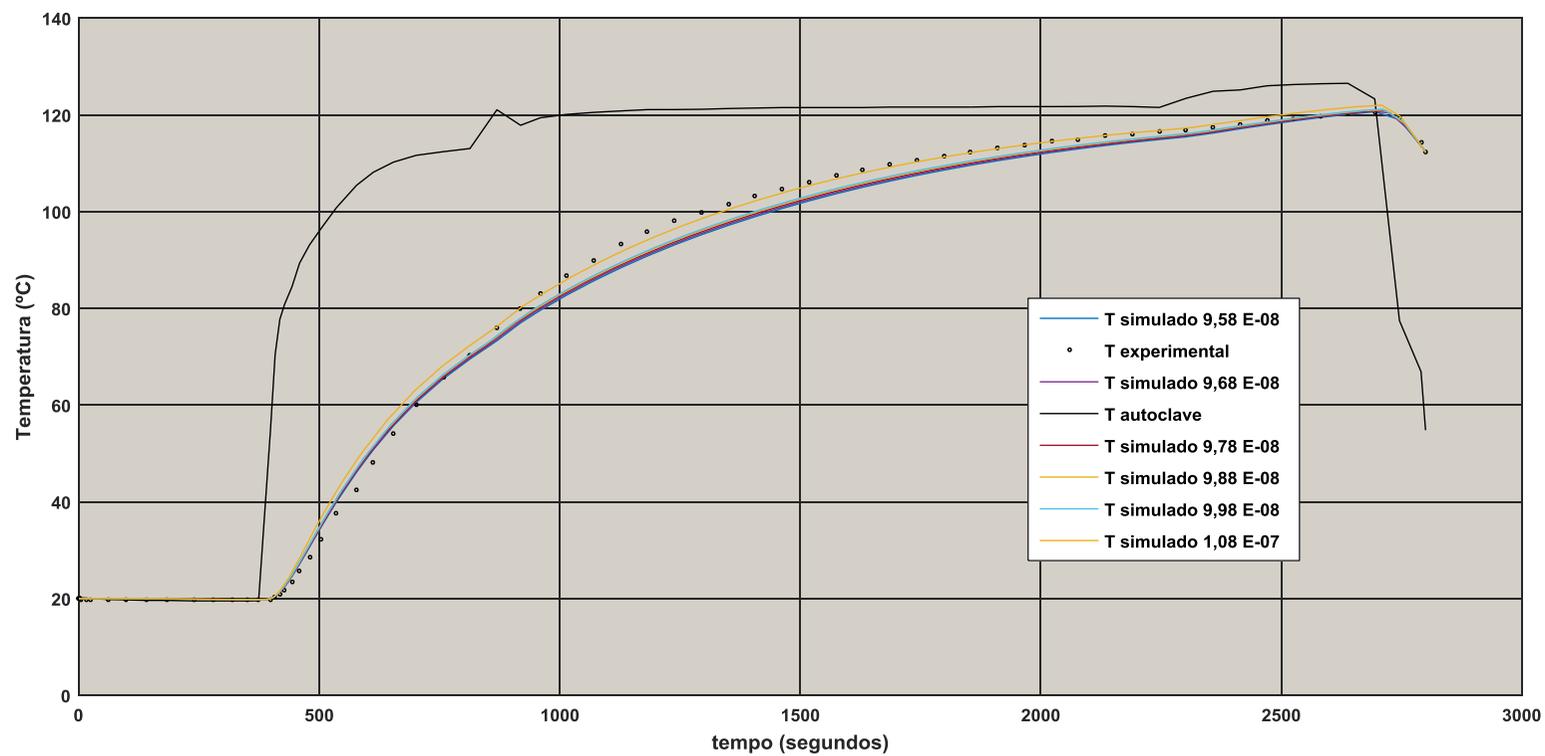
Com base no gráfico apresentado na **Figura 4.4**, pode-se perceber que os valores calculados de RMSE apresentaram pouca variação entre si para os valores de difusividade térmica compreendidos entre **9,68E-08 m²/s** e **9,88E-08 m²/s**. Este fato sugere que estes valores de difusividade térmica aparente, adotados para realizar as simulações computacionais, não apresentaram diferença significativa entre si para a etapa de aquecimento inicial.

Uma possível explicação para o comportamento apresentado na **Figura 4.4** poderia estar relacionada com a maior velocidade de difusão do calor na etapa inicial de aquecimento, quando o produto alimentício ainda se encontra em temperatura inferiores a 80°C. Para o valor da difusividade igual a **9,88E-08 m²/s** o RMSE é aproximadamente 20% menor em comparação com os anteriores, indicando assim que o valor encontrado é o que melhor representa a propriedade em estudo.

Os resultados obtidos com este trabalho sugerem que os valores adotados para a difusividade térmica aparente seriam menores do que os valores reais quando o produto alimentício estiver com a temperatura compreendida entre 80°C e 110°C. Nesta faixa de valores de temperatura a difusão do calor através do produto tende a diminuir e – por consequência – a retenção do calor deve aumentar. Este fato promoveria o aumento das temperaturas nos nós mais próximos à superfície da embalagem do produto alimentício em detrimento do aumento da temperatura no ponto mais interno do conjunto embalagem/produto alimentício.

Na **Figura 4.5** são apresentados os resultados de todas as simulações realizadas considerando os diferentes valores de difusividade térmica estudados.

Figura 4.5: Comparação dos resultados considerando todas as simulações realizadas



Fonte: autoria própria (2023)

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

Este capítulo tem por finalidade apresentar as conclusões alcançadas com o trabalho e apresentar as recomendações para a continuidade da pesquisa.

A esterilização térmica de alimentos enlatados em autoclaves pressurizadas é um dos métodos mais utilizados no que diz respeito à preservação de alimentos. É um fator determinante ao bem-estar nutricional das pessoas a eliminação de esporos de bactérias e de microrganismos nocivos ao corpo humano. Esses microrganismos quando presentes nos alimentos produzem uma série de toxinas que, mesmo em quantidades infinitesimais, podem ser letais.

De um modo geral, a indústria de alimentos vem utilizando de forma intensiva os sistemas de automação nos processos de esterilização, com a finalidade de garantir que o processamento térmico imposto elimine, com segurança, os microrganismos indesejáveis que possam estar presentes no produto alimentício. Para se alcançar tal meta é essencial que o processamento térmico sofra um rígido controle toda vez que for empregado.

A predição da temperatura do produto alimentício ensaiado no ponto mais central do conjunto embalagem/produto foi realizada com sucesso. O modelo matemático proposto permitiu representar adequadamente o comportamento temporal da temperatura, com desvios entre os valores medidos e simulados inferiores a 5°C, no pior caso.

O emprego dos fundamentos o método inverso para a predição da temperatura foi verificado com sucesso, sendo possível estabelecer o valor médio global do parâmetro difusividade térmica do produto alimentício a partir dos resultados obtidos nos experimentos realizados.

Como pôde ser percebido ao longo do texto, optou-se por abordar o cálculo do valor da difusividade térmica aparente do produto alimentício estudado. Contudo, é sabido que as

propriedades de transporte de calor podem variar com a temperatura durante o processo e este fato não foi considerado.

O emprego de um valor médio global para a difusividade térmica mostrou que o procedimento é importante e útil na identificação do valor do parâmetro para produtos de composição/formulação não conhecidas. Contudo os valores de RMSE verificados para a temperatura simulada indicam que o emprego de um valor de difusividade térmica que varie com a temperatura possa fornecer um valor mais preciso para a propriedade em questão.

Dito isso, uma sugestão que surge naturalmente para a continuidade desta pesquisa é a modificação do algoritmo empregado, visando obter o valor da difusividade térmica melhorado.

Outra sugestão para a continuidade desta pesquisa seria a aplicação do modelo desenvolvido na área da automação de processos, empregando o modelo como um sensor virtual ou mesmo como um elemento dinâmico da estratégia de controle.

No caso de ser usado como sensor virtual, o modelo poderia desempenhar o papel de um sensor físico (real), estimando a temperatura do produto a partir da temperatura da autoclave. Já, no caso de ser um elemento dinâmico da estratégia de controle, o modelo poderia ser empregado para avaliar a influência de desvios na temperatura da autoclave sobre o índice de letalidade imposto ao microrganismo de referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKTERIAN, S.G. On-line control strategy for compensating for arbitrary deviations in heating-medium temperature during batch thermal sterilization processes. **Journal of Food Engineering**, v.39, p. 1- 7, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00136-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00136-8)

AZAR, A. B.; RAMEZAN, Y.; KHASHEHCHI, M. Numerical simulation of conductive heat transfer in canned celery stew and retort program adjustment by computational fluid dynamics (CFD). **Int. J. Food Eng.** 2020; 16(9): 20190303. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0303>.

BAEK, D. C.; LEE, S. B. Inverse Method to Determine Mechanical Properties of Thin Film by Nanoindentation and Finite Element Analysis. **Key Engineering Materials**, v. 326–328, 2006. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.219](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.219).

BARATAUD, F., STEMMELEN, D., MOYNE, C. (1996). Identification of the Hydraulic Diffusivity of a Soil by Inverse Method with Dual-Energy Gamma Ray Attenuation Measurements. In: Gottlieb, J., DuChateau, P. (eds). **Parameter Identification and Inverse Problems in Hydrology, Geology and Ecology**. Water Science and Technology Library, vol 23. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1704-0_6.

BASTOS, J.L.F. Notas de aula da disciplina análise termofluído-dinâmica de reatores nucleares. Departamento de Tecnologia de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1994.

BECK, J. V.; ARNOLD, K. J. **Parameter estimation in engineering and science**. Wiley. 1977.

BERTELI, M.N.; BERTO, M. I.; VITALI, A. DE A. (2013). Aplicabilidade do método de Ball para o cálculo da letalidade de processos de esterilização em autoclaves a vapor desaeradas por água. **Brazilian Journal of Food Technology**, 16(3), 243–252. <https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000030>.

BERTO, M. I.; VITALI, A. DE A. (2008). Controle em tempo real em um processo de esterilização convencional. **Brazilian Journal of Food Technology**, 11(4), 252–262.

BITTING, A.W. Appertizing or the art of canning; its history and development. The Trade Pressroom. San Francisco, California, 1937.

CASTILLO, A.G.C.; GAUME, B.; ROUIZI, Y.; QUÉMÉNER, O.; GLOUANNEC, P. Identification of insulating materials thermal properties by inverse method using reduced order model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 166, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120683>.

CORNEJO, I.; CORNEJO, G.; RAMÍREZ, C.; ALMONACID, S.; SIMPSON, R. Inverse method for the simultaneous estimation of the thermophysical properties of foods at freezing temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 191, 2016. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.07.003.

CZÉL, B.; WOODBURY, K.A.; GRÓF, G. Simultaneous estimation of temperature-dependent volumetric heat capacity and thermal conductivity functions via neural networks. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 68, 2014. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.010.

DATTA, A.K.; TEIXEIRA, A.A.; MANSON, J.E. Computer-based retort control logic for on-line correction of process deviations. **Journal of Food Science**, v. 51, n. 2, p. 480 - 483, 1986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb11161.x>

DEAK, T.; MOHÁCKSI-FARKAS, C. (2023). Food Safety Management: A Practical Guide for the Food Industry. In: Veslemøy Andersen, Huub L. M. Lelieveld, Yasmine Motarjemi (eds). **Chapter 20: Thermal Treatment**. Elsevier Inc. Índia. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820013-1.00008-5>.

EBRAHIMIFAKHAR, A.; YUILL, D. Inverse estimation of thermophysical properties and initial moisture content of cereal grains during deep-bed grain drying. **Biosystems Engineering**, v. 196, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.021>.

FABBRI, A.; CEVOLI, C.; TRONCOSO, R. Moisture diffusivity coefficient estimation in solid food by inversion of a numerical model. **Food Research International**, v. 56, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.002>.

FASTAG, J.; KOIDE, H.; RIZVI, S.S.H. Variable control of a batch retort and process simulation for optimization studies. **Journal of food process engineering**, v. 19, n. 1, p. 1-14, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1996.tb00377.x>

FONTANA, A.J.; WACKER, B.; CAMPBELL, C.; CAMPBELL, G.S. Simultaneous thermal conductivity, thermal resistivity, and thermal diffusivity measurement of selected foods and soils. Paper Number 01-6101. In: **2001 ASAE Annual International Meeting**, California, EUA, 2001.

GEDRAITE, R. (1999). **Desenvolvimento e implementação de algoritmo computacional para garantir um determinado nível de letalidade acumulada para microrganismos presentes em alimentos industrializados**. 1999, São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

GEDRAITE, R.; BARBOSA, R.Y.M.; SANTANA, A.A. (2021). Determinação da difusividade térmica da proteína texturizada de soja por meio de um problema inverso. In: **Anais do Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC**. 15 a 17 de setembro de 2021. Confea – CREA-GO – Mútua.

GEDRAITE, R.; LEONHARDT, G.F. (1997). Modernização da instrumentação de autoclave estacionária para esterilização de alimentos. **In: ISA SHOW BRASIL/97**, São Paulo, 1997. Anais. São Paulo, ISA, 1997. disquete.

GERMER, S.P.M. Avaliação dos desvios no processamento térmico de alimentos em conserva. **Informativo FRUTHOTEC**, v. 3, n. 2, p. 2-3, 1997.

GHATREHSAMANI, S.; AMPATZIDIS, Y.; SADEGHI, B.; GHATREHSAMANI, S. (2018). Measurement of thermal diffusivity of wheat and maize and comparison by Dickerson method. **In: proceedings of 2018 ASABE Annual International Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. <https://doi.org/10.13031/aim.201800160>.

GONTIJO, D.L.M.; BARBOSA, R.Y.M.; GEDRAITE, R. (2022). Controle inferencial para esterilização de alimentos. In: Paniagua, C.E.S. (organizador). **Engenharia química: Desenvolvimento de novos processos e produtos 2**. Atena Editora, Ponta Grossa. [DOI 10.22533/at.ed.1182212083](https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212083).

GONTIJO, D.L.M.; BARBOSA, R.Y.M.; SILVA, J.C.; GEDRAITE, R. (2021). Emprego de modelo matemático para melhorar o controle do processo de esterilização de alimentos. In: **Anais da I Semana da Engenharia de Alimentos da UFU (SeAli)**. 18 a 22 de outubro de 2021. Faculdade de Engenharia Química/UFU, Patos de Minas.

GREIBY, I.; MISHRA, D.K.; DOLAN, K.D. Inverse method to sequentially estimate temperature-dependent thermal conductivity of cherry pomace during nonisothermal heating. **Journal of Food Engineering**, v. 127, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.039>.

HASHIN, Z.; MONTEIRO, P.J.M. An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00792-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00792-5).

HENRIKSON, F.W. **On-line quality control: advances in sensor technology**. Netherlands, ELSEVIER, 1995. <https://doi.org/10.1016/B978-044481500-2/50005-0>

HOLDSWORTH, S.D.; SIMPSON, R. **Thermal processing of packaged food**. Springer International Publishing AG, Switzerland. 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24904-9>.

LAROUSSE, J.; BROWN, B.E. **Food Canning Technology**. New York, Wiley - VCH Inc, 1997.

LEONHARDT, G.F. **Notas de aula da disciplina operações unitárias da indústria de alimentos - enlatamento: tecnologia e engenharia**. Departamento. de Engenharia Química e de Alimentos da Escola de Engenharia Mauá, 2003.

LORINCZI, P.; BURNS, A.D.; LESNIC, D.; FISHER, Q.J.; CROOK, A.J.; GRATTONI, C.; RYBALCENKO, K. **Direct and inverse methods for determining gas flow properties of shale**. Society of Petroleum Engineers - European Unconventional Resources Conference and Exhibition 2014: Unlocking European Potential. <https://doi.org/10.2118/167750-MS>.

MARIANI, V.C.; LIMA, A.G.B.; COELHO, L.S. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 4, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.018>.

McFARLANE, I. **Automatic control of food manufacturing processes**. Glasgow, Blackie Academic and Professional, 1995. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2187-7>

MENDONÇA, S.L.R.; FILHO, C.R.B.; SILVA, Z.E. Transient conduction in spherical fruits: Method to estimate the thermal conductivity and volumetric thermal capacity. **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 3, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.026>.

MITTAL, G. S. **Computadorized control systems in the food industry**. New York, Marcel Dekker, Inc., 1997.

MOHAMED, I.O. Determination of cold spot location for conduction-heated canned foods using an inverse approach. **International Journal of Food Processing Technology**, v. 2, n. 2, 2015. <http://dx.doi.org/10.15379/2408-9826.2015.02.02.02>.

MOHAMED, I.O. Development of a simple and robust inverse method for determination of thermal diffusivity of solid foods. **Journal of Food Engineering**, v. 101, n. 1, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.11.002>.

MOHAMED, I.O. Simultaneous estimation of thermal conductivity and volumetric heat capacity for solid foods using sequential parameter estimation technique. **Food Research International**, v. 42, n. 2, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.11.002>.

MURAMATSU, Y.; GREIBY, I.; MISHRA, D.K.; DOLAN, K.D. Rapid inverse method to measure thermal diffusivity of low-moisture foods. **Journal of Food Science**. [Volume 82, Issue 2](https://doi.org/10.1111/1750-3841.13563). February 2017, pp. 420-428. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13563>.

NAYAK, J.; VAKULA, K.; DINESH, P.; NAIK, B.; PELUSI, D. Intelligent food processing: Journey from artificial neural network to deep learning. **Computer Science Review** 38 (2020) 100297. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100297>.

NORONHA, J. F.; LOEY, A. V.; HENDRICKX, M.; TOBBACK, P. An empirical equation for the description of optimum variable retort temperature profiles that maximize surface quality retention in thermally processed foods. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 20, p. 251 - 264, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1996.tb00746.x>

OHLSSON, T.; BENGTSSON, N. **Minimal processing technologies in the food industry**. Cambridge, CRC Press, 2000.

PANDEY, V.; BEKELE, A.; AHMED, G.M.S.; KANU, N.J.; SINGH, G.K. An application of conjugate gradient technique for determination of thermal conductivity as an inverse engineering problem. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.073>.

QIAN, S.; LI, V.C. Simplified inverse method for determining the tensile properties of strain hardening cementitious composites (SHCC). **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 6, n. 2, 2008. <https://doi.org/10.3151/jact.6.353>

RAPPAZ, M.; DESBIOLLES, J.L.; DREZET, J.M.; GANDIN, C.H.A.; JACOT, A.; THEVOZ, P.H. Application of inverse methods to the estimation of boundary conditions and properties. **In: Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes**. Minerals, Metals & Materials Soc (TMS), 1995.

RIBEIRO, E.P.; SERAVALLI, E.A.G. **Química de Alimentos**. São Paulo, Edgard Blücher, 2004.

RODRIGUES, J.A.D.; SCHMIDT, F.L.; VITALI, A.A., TEIXEIRA NETO, R.O.; TEIXEIRA, A.A.; GERMER, S.P.M.; SADAHIRA, M.S. Comparação entre técnicas numéricas para a resolução do problema de transferência de calor em alimentos enlatados. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 18, n. 2, p. 230 - 236, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0101-20611998000200016>

SILVA, W.P.; PRECKER, J.W.; SILVA, C.M.D.P.S.; GOMES, J.P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 3, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.029>.

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**, 285 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110104>.

SIMPSON, R.; JIMÉNEZ, D.; ALMONACID, S.; NUÑEZ, H.; PINTO, M.; RAMÍREZ, C.; VEGA-CASTRO, O.; FUENTES, L.; ÂNGULO, A. Assessment and outlook of variable retort temperature profiles for the thermal processing of packaged foods: plant productivity, product quality, and energy consumption. **Journal of Food Engineering**, **Volume 275**, June 2020, <https://doi.org/10.1016@j.jfoodeng.2019.109839>.

ŠIMŮNEK, J.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SCHAAP, M.G.; VANDERVAERE, J.; VAN GENUCHTEN, M.TH. Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. **Geoderma**, v. 86, n. 1–2, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00035-4).

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control**. New Jersey, Prentice Hall, 1984.

TANER, A.H.; BRIGNELL, J.E. Virtual instrumentation and intelligent sensors. **Sensors and Actuators**, n. 61, p. 427 - 430, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)80300-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)80300-7)

TEIXEIRA A.A.; BALABAN, M. **Notas de aula do curso computer applications in thermal processing of canned foods**. ITAL, Campinas, 1996.

TEIXEIRA, A. A., BALABAN, M. O; GERMER, S. P. M., SADAHIRA, M. S., TEIXEIRA NETO, R. O. & VITALI, A. A. Heat transfer model performance in simulation of process deviations. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 3, p. 488 - 493, 1999. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15068.x>

TEIXEIRA, A.A.; DIXON, J.R.; ZAHRADNICK, J.W.; ZINSMEISTER, G.E. Computer optimization of nutrient retention in thermal processing of conduction-heated foods. **Food Technology**, v. 23, n. 6, p. 137, 1969a.

TEIXEIRA, A.A.; DIXON, J.R.; ZAHRADNICK, J.W.; ZINSMEISTER, G.E. Computer determination of spore survival distributions in thermally-processed conduction-heated foods. **Food Technology**, v. 23, n. 7, p. 78, 1969b.

TEIXEIRA, A.A.; MANSON, J.E. Computer control of batch retort operations with on-line correction of process deviations. **Food Technology**, v. 36, n. 4, p. 85-90, 1982.

TEIXEIRA, A.A.; ZINSMEISTER, G.E.; ZAHRADNICK, J.W. Computer simulation of variable retort control and container geometry as a possible means of improving thiamine retention in thermally processed foods. **Journal of Food Science**, v. 40, n. 3, p. 656 - 659, 1975. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1975.tb00522.x>

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. 2nd ed. London, Chapman & Hall, 1994.

VARGA, S.; OLIVEIRA, J. C.; SMOUT, C.; HENDRICKX, M. E. Modelling temperature variability in batch retorts and its impact on lethality distribution. **Journal of Food Engineering**, v.44, p. 163- 174, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00021-2)

XIONG, R.; XIE, G.; EDMONDSON, A.E.; SHEARD, M.A. A mathematical model for bacterial inactivation. **International Journal of Food Microbiology**, v. 46, p. 45 – 55, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(98\)00172-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(98)00172-X)

ZHANG, Q.; LIPPMANN, S.; GRASEMANN, A.; ZHU, M.; RETTENMAYR, M. Determination of temperature dependent thermophysical properties using an inverse method and an infrared line camera. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 96, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.020>.

ZHU, S. ; LI, B. ; CHEN, G. (2022). Improving prediction of temperature profiles of packaged food during retort processing. **Journal of Food Engineering**, 313, 110758. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110758>.

Anexo I

CÁLC. CONDUCTANCIAS RADIAIS PARA OS NÓS INTERNOS

i	rint(i)	rext(i)	gr(i)
1	0,0045	0,0135	4,89E-10
2	0,0135	0,0225	1,05E-09
3	0,0225	0,0315	1,60E-09
4	0,0315	0,0405	2,14E-09

CÁLC. CONDUCTANCIAS AXIAIS PARA OS NÓS INTERNOS

i	riint(i)	reext(i)	área(i)	volume(i)	ga(i)
1	0	0,009	6,36173E-05	2,17889E-07	1,85E-09
2	0,009	0,018	0,000190852	6,53667E-07	5,56E-09
3	0,018	0,027	0,000318086	1,08945E-06	9,27E-09
4	0,027	0,036	0,000445321	1,52522E-06	1,30E-08

$$dr = 0,009 \text{ m}$$

$$dz = 0,003425 \text{ m}$$

$$\text{alfa} = 9,98E-08 \text{ m}^2/\text{s}$$

BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA PARA OS NÓS (2,2); (2,3); (3,2); (3,3)

$$i = 2,3$$

$$j = 2,3$$

$$\text{vol}(2) \cdot dTdt22 = gr(1) \cdot (T12 - T22) + gr(2) \cdot (T32 - T22) + ga(2) \cdot (T21 - T22) + ga(2) \cdot (T23 - T22)$$

$$\text{vol}(2) \cdot dTdt23 = gr(1) \cdot (T13 - T23) + gr(2) \cdot (T33 - T23) + ga(2) \cdot (T22 - T23) + ga(2) \cdot (T24 - T23)$$

$$\text{vol}(3) \cdot dTdt32 = gr(2) \cdot (T22 - T32) + gr(3) \cdot (T42 - T32) + ga(3) \cdot (T31 - T32) + ga(3) \cdot (T33 - T32)$$

$$\text{vol}(3) \cdot dTdt33 = gr(2) \cdot (T23 - T33) + gr(3) \cdot (T43 - T33) + ga(3) \cdot (T32 - T33) + ga(3) \cdot (T34 - T33)$$

BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA PARA OS NÓS (1,1); (4,1)

$$\text{vol}(1) \cdot dTdt11 = gr(1) \cdot (T21 - T11) + 2 \cdot ga(1) \cdot (T_{\text{vapor}} - T11) + ga(1) \cdot (T12 - T11)$$

$$\text{vol}(4) \cdot dTdt41 = gr(3) \cdot (T31 - T41) + gr(4) \cdot (T_{\text{vapor}} - T41) + 2 \cdot ga(4) \cdot (T_{\text{vapor}} - T41) + ga(4) \cdot (T42 - T41)$$

BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA PARA OS NÓS (2,1); (3,1)

$$i = 2,3$$

$$j = 1$$

$$\text{vol}(2) * dTdt21 = \text{gr}(1) * (T11 - T21) + \text{gr}(2) * (T31 - T21) + 2 * \text{ga}(2) * (T_{\text{vapor}} - T21) + \text{ga}(2) * (T22 - T21)$$

$$\text{vol}(3) * dTdt31 = \text{gr}(2) * (T21 - T31) + \text{gr}(3) * (T41 - T31) + 2 * \text{ga}(3) * (T_{\text{vapor}} - T31) + \text{ga}(3) * (T32 - T31)$$

BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA PARA OS NÓS (1,4); (4,4)

$$\text{vol}(1) * dTdt14 = \text{gr}(1) * (T24 - T14) + \text{ga}(1) * (T13 - T14)$$

$$\text{vol}(4) * dTdt44 = \text{gr}(3) * (T34 - T44) + \text{gr}(4) * (T_{\text{vapor}} - T44) + \text{ga}(4) * (T43 - T44)$$

BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA PARA OS NÓS (2,4); (3,4)

$$i = 2,3$$

$$j = 4$$

$$\text{vol}(2) * dTdt24 = \text{gr}(1) * (T14 - T24) + \text{gr}(2) * (T34 - T24) + \text{ga}(2) * (T23 - T24)$$

$$\text{vol}(3) * dTdt34 = \text{gr}(2) * (T24 - T34) + \text{gr}(3) * (T44 - T34) + \text{ga}(3) * (T33 - T34)$$

BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA PARA OS NÓS (1,2); (1,3)

$$j = 2,3$$

$$i = 1$$

$$\text{vol}(1) * dTdt12 = \text{gr}(1) * (T22 - T12) + \text{ga}(1) * (T11 - T12) + \text{ga}(1) * (T13 - T12)$$

$$\text{vol}(1) * dTdt13 = \text{gr}(1) * (T23 - T13) + \text{ga}(1) * (T12 - T13) + \text{ga}(1) * (T14 - T13)$$

BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA PARA OS NÓS (4,2); (4,3)

$$j = 2,3$$

$$i = 4$$

$$\text{vol}(4) * dTdt42 = \text{gr}(3) * (T32 - T42) + \text{gr}(4) * (T_{\text{vapor}} - T42) + \text{ga}(4) * (T41 - T42) + \text{ga}(4) * (T43 - T42)$$

$$\text{vol}(4) * dTdt43 = \text{gr}(3) * (T33 - T43) + \text{gr}(4) * (T_{\text{vapor}} - T43) + \text{ga}(4) * (T42 - T43) + \text{ga}(4) * (T44 - T43)$$

