



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



LAILA LEAL

Otimização do Processo de Esterilização de Alimentos Enlatados: Monitoramento
Computacional e Integração de Dados na Nuvem

Patos de Minas – MG
2025

LAILA LEAL

Otimização do Processo de Esterilização de Alimentos Enlatados: Monitoramento Computacional e Integração de Dados na Nuvem

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

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Coorientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Sislian

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

L435 2025	Leal, Laila, 1992- Otimização do Processo de Esterilização de Alimentos Enlatados [recurso eletrônico] : Monitoramento Computacional e Integração de Dados na Nuvem / Laila Leal. - 2025. Orientador: Dr. Rubens Gedraite. Coorientador: Dr. Rodrigo Sislian. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.106 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Alimentos - Indústria. I. Gedraite, Dr. Rubens, 1958-, (Orient.). II. Sislian, Dr. Rodrigo, 1983-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título. CDU: 664
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - Patos de Minas

Rua Vereador Chico Filgueira, 33, 3º andar, Sala 21 - Bairro Caiçaras, Patos de Minas-MG, CEP 38702-178

Telefone: (34) 3823-3714 - www.ppgea.feq.ufu.br - coordppgea@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia de Alimentos				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico n. 4/2025 - PPGEA				
Data:	Vinte e sete de fevereiro de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	17:30	Hora de encerramento:	19:27
Matrícula do Discente:	42312EAL008				
Nome do Discente:	Laila Leal				
Título do Trabalho:	Otimização do Processo de Esterilização de Alimentos Enlatados: Monitoramento Computacional e Integração de Dados na Nuvem				
Área de concentração:	Engenharia de Alimentos				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento de Processos e Produtos				

Reúne-se por webconferência (MConf - RNP) a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, assim composta: Rubens Gedraite (Presidente/Orientador), Lucas Donizete Silva (Membro Externo) e Sarah Arvelos Altino (Membro UFU).

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa apresentou a Comissão Examinadora e o(a) discente, agradeceu a participação do público, e concedeu ao(à) discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) mesmo(a) se deu em conformidade às normas do Programa.

A seguir, o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos legais, a Banca Examinadora, em sessão reservada, atribuiu o conceito final, considerando o(a) discente:

Aprovada.

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico integra os requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

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 será assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/02/2025, às 19:31, 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 **Sarah Arvelos Altino, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/02/2025, às 19:31, 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 **Lucas Donizete Silva, Usuário Externo**, em 27/02/2025, às 19:32, 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 **6131051** e o código CRC **286E3760**.

Referência: Processo nº 23117.012351/2025-18

SEI nº 6131051

LAILA LEAL

Otimização do Processo de Esterilização de Alimentos Enlatados: Monitoramento
Computacional e Integração de Dados na Nuvem

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

Patos de Minas, 27/02/2025

Banca Examinadora:

Rubens Gedraite – Doutorado (UFU)

Rodrigo Sislian – Doutorado (IFSP)

Sarah Arvelos Altino – Doutorado (UFU)

Lucas Donizete Silva – Pós-doutorando (UFTM)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo
estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus; sem Ele, absolutamente nada disso seria possível. Toda a força e sabedoria necessárias para este trabalho vieram Dele.

Agradeço também ao meu orientador prof. Dr. Rubens Gedraite e coorientador prof. Dr. Rodrigo Sislian pela paciência e orientação ao longo deste processo. Aos membros da banca, muito obrigado por terem aceito participar desta avaliação.

À minha família, especialmente meus pais, Nivaldo e Sandra, por todo o apoio, amor e incentivo incondicional.

Aos amigos Rafael Yuri, Natália Salete e Carlos Eduardo que estiveram ao meu lado, trazendo apoio, leveza e alegria nos momentos certos, minha eterna gratidão.

A todos, muito obrigado!

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo estímulo, carinho e compreensão.

“Se as pessoas não acreditam que a matemática
é simples, é porque não percebem o quão
complicada a vida é.”
(Von Neumann, 1956, p. 208)

RESUMO

A esterilização térmica de alimentos enlatados é essencial para garantir a segurança microbiológica e a estabilidade dos produtos. Este estudo teve como objetivo simular o comportamento térmico do patê de alcachofra durante a esterilização, validando os resultados por meio de modelagem matemática e integração computacional. O produto foi escolhido devido à sua baixa acidez ($pH > 4,5$), tornando-se suscetível à contaminação por *Clostridium botulinum*, cujos esporos apresentam elevada resistência térmica. A modelagem do processo foi realizada pelo Método dos Volumes Finitos (MVF) com reconstrução de alta ordem, assegurando maior precisão na simulação. A difusividade térmica foi considerada uma função da temperatura, com parâmetros determinados por otimização, minimizando o erro entre os resultados simulados e os dados experimentais. A equação diferencial da condução de calor foi resolvida pelo Método de Euler Implícito, garantindo estabilidade numérica. A atualização da solução no tempo exigiu o Método de Newton N-dimensional, possibilitando a resolução simultânea das equações dos volumes de controle. Para a aproximação das derivadas, foi utilizada a Matriz Jacobiana, assegurando a convergência das soluções numéricas. Além da simulação, foi implementado um sistema de monitoramento remoto baseado em uma arquitetura cliente-servidor via TCP/IP, permitindo a transmissão e análise em tempo real dos dados de temperatura. A letalidade acumulada (F_0), parâmetro determinante para a eficácia do processo, foi calculada pela Regra dos Trapézios, garantindo atualização contínua conforme os dados eram adquiridos. Os resultados apresentaram elevada correlação com os dados experimentais reportados por Gedraite (1999), validando a precisão do modelo adotado. O cálculo da letalidade confirmou que os parâmetros térmicos foram suficientes para a inativação de *Clostridium botulinum*, garantindo a segurança microbiológica do produto. A integração entre modelagem matemática e monitoramento remoto demonstrou potencial para otimização e controle avançado de processos térmicos na indústria de alimentos. Conclui-se que a metodologia proposta representa um avanço na modelagem computacional da esterilização, contribuindo para a modernização e eficiência dos processos industriais.

Palavras-chave: Esterilização térmica. Modelagem matemática. Integração de Dados na Nuvem. Monitoramento remoto. Indústria de alimentos

ABSTRACT

Thermal sterilization of canned foods is essential to ensure microbiological safety and product stability. This study aimed to simulate the thermal behavior of artichoke pâté during sterilization, validating the results through mathematical modeling and computational integration. The product was chosen due to its low acidity ($\text{pH} > 4.5$), making it susceptible to contamination by *Clostridium botulinum*, whose spores exhibit high thermal resistance. The process modeling was performed using the Finite Volume Method (FVM) with high-order reconstruction, ensuring greater simulation accuracy. Thermal diffusivity was considered a function of temperature, with parameters determined through optimization, minimizing the error between the simulated results and experimental data. The heat conduction differential equation was solved using the Implicit Euler Method, ensuring numerical stability. The time-dependent solution update required the N-dimensional Newton Method, enabling the simultaneous resolution of the control volume equations. To approximate the derivatives, the Jacobian Matrix was employed, ensuring the convergence of numerical solutions. In addition to the simulation, a remote monitoring system was implemented based on a client-server architecture via TCP/IP, allowing real-time transmission and analysis of temperature data. The accumulated lethality (F_0), a critical parameter for process efficiency, was calculated using the Trapezoidal Rule, ensuring continuous updates as data were acquired. The results showed a high correlation with the experimental data reported by Gedraite (1999), validating the accuracy of the adopted model. The lethality calculation confirmed that the thermal parameters were sufficient for the inactivation of *Clostridium botulinum*, ensuring the microbiological safety of the product. The integration of mathematical modeling and remote monitoring demonstrated potential for the optimization and advanced control of thermal processes in the food industry. It is concluded that the proposed methodology represents an advancement in the computational modeling of sterilization, contributing to the modernization and efficiency of industrial processes.

Keywords: Thermal sterilization. Mathematical modeling. Cloud Data Integration. Remote monitoring. Food industry

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1:	Fluxograma de engenharia de uma autoclave estacionária vertical.....	33
Figura 3.2:	<i>Hardware</i> do sistema de controle da autoclave.....	35
Figura 3.3:	Perfil de temperatura da autoclave em função do tempo.....	35
Figura 3.4:	Diagrama descritivo da comunicação cliente-servidor via protocolo TCP/IP.....	45
Figura 4.1:	Simulação da temperatura em função do tempo ao final do processo.....	46
Figura 4.2:	Simulação da letalidade em função do tempo ao final do processo.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
AWS	<i>Amazon Web Services</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BIG DATA	Conjunto de grandes volumes de dados armazenados e processados digitalmente
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento (<i>Central Processing Unit</i>)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EDP	Equação Diferencial Parcial
EDO	Equação Diferencial Ordinária
F_0	Valor da letalidade térmica acumulada
H_2O_2	Peróxido de Hidrogênio
IaaS	Infraestrutura como Serviço (<i>Infrastructure as a Service</i>)
<i>IoT</i>	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
MVF	Método dos Volumes Finito
PaaS	Plataforma como Serviço (<i>Platform as a Service</i>)
SaaS	<i>Software</i> como Serviço (<i>Software as a Service</i>)
TI	Tecnologia de Informação
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS	17
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA....	14
2.1 PATÊ DE ALCACHOFRAS	14
2.2 - PROCESSAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS.....	15
2.3 - ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS.....	16
2.4 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CORPOS CILÍNDRICOS APLICADA AO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS ENLATADOS.....	17
2.5 - <i>CLOSTRIDIUM BOTULINUM</i> : RISCOS MICROBIOLÓGICOS E A NECESSIDADE DO TRATAMENTO TÉRMICO.....	19
2.6 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTROLE REGULATÓRIO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS.....	21
2.7 - ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS.....	22
2.8 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE SENSORES VIRTUAIS NO CONTROLE DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE PRODUTO ALIMENTÍCIO INDUSTRIALIZADO.....	23
2.9 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONCEITO DE INDÚSTRIA 4.0.....	25
2.10 – CONSIDERAÇÕES SOBRE COMPUTAÇÃO NA NUVEM.....	26
2.10.1 – CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DA COMPUTAÇÃO NA NUVEM.....	27
2.10.2 – MODELOS E SERVIÇOS.....	28
2.11 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZADA.....	30
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 – AUTOCLAVE UTILIZADA.....	32
3.2 – FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE.....	33
3.3 -METODOLOGIA.....	35
3.3.1. MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO.....	35
3.3.2. CÁLCULO DA LETALIDADE EM PROCESSOS DE ESTERILIZAÇÃO TÉRMICA APLICANDO A REGRA DOS TRAPÉZIOS.....	37
3.3.3. OBTENÇÃO DOS DADOS DE VALIDAÇÃO.....	41
3.3.4. IMPLEMENTAÇÃO DA COMUNICAÇÃO CLIENTE-SERVIDOR VIA TCP/IP E EXPOSIÇÃO HTTP COM NGROK.....	41
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1. COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA.....	46
4.2. AVALIAÇÃO DA LETALIDADE MICROBIOLÓGICA.....	46
4.3. APLICAÇÃO DA ARQUITETURA CLIENTE – SERVIDOR.....	47
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES, PROPOSTAS FUTURAS E CRONOGRAMA.....	48
5.1 – CONCLUSÕES.....	48
5.2 – PROPOSTAS FUTURAS.....	49
5.3 – TRABALHOS PUBLICADOS.....	49
REFERÊNCIAS.....	50

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica e a crescente demanda por alimentos seguros impulsiona a indústria alimentícia a adotar soluções inovadoras para garantir a qualidade e a segurança microbiológica dos produtos **(CARVALHO; ARAÚJO, 2017)**. Nesse cenário, a Indústria 4.0 revolucionou o setor ao integrar automação, monitoramento remoto e análise de dados em tempo real, promovendo um nível sem precedentes de controle e eficiência nos processos produtivos **(GEPEA, 2021)**. A implementação de tecnologias digitais possibilita não apenas a otimização da produção, mas também o cumprimento rigoroso das normas de segurança alimentar, mitigando riscos associados a contaminações microbiológicas e assegurando a estabilidade dos produtos ao longo de sua vida útil **(CARVALHO; ARAÚJO, 2017)**.

Dentre os desafios mais críticos da indústria de alimentos está o controle microbiológico em produtos enlatados, uma vez que a ausência de oxigênio, ambiente úmido e a presença de nutrientes favorecem o crescimento de microrganismos patogênicos. O *Clostridium botulinum*, bactéria anaeróbia formadora de esporos, representa um risco significativo nesse contexto, pois é capaz de produzir a toxina botulínica, uma substância letal, responsável pelo botulismo, uma doença neuro parálitica grave. A resistência térmica dos esporos desse patógeno demanda um rigoroso controle de esterilização térmica, especialmente em alimentos de baixa acidez, como o patê de alcachofra, que requer tratamento térmico a temperaturas superiores a 115°C para garantir a destruição completa dos esporos e a segurança do consumidor **(MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025)**.

Os esporos do *C. botulinum* são altamente resistentes e podem sobreviver a temperaturas de 100°C por longos períodos, exigindo métodos mais eficazes de processamento térmico, como a esterilização em autoclaves a temperaturas entre 115°C e 121°C **(STUMBO, 1973)**. A termorresistência dos esporos é influenciada pela umidade e a composição do meio. Assim, garantir o controle térmico adequado é essencial para a segurança microbiológica dos alimentos **(GERMANO; GERMANO, 2011)**.

A regulamentação sanitária no Brasil exige rigoroso controle na esterilização de alimentos enlatados. A Resolução RDC nº 352/2002 da ANVISA determina as Boas Práticas de Fabricação para conservas vegetais, enfatizando a necessidade de processos térmicos

eficazes para garantir a segurança microbiológica dos produtos. Dessa forma, o desenvolvimento de metodologias avançadas para monitoramento e otimização da esterilização térmica não apenas assegura a qualidade e segurança dos produtos, mas também contribui para o cumprimento das exigências regulatórias.

A alcachofra (*Cynara scolymus L.*) apresenta uma relevância tanto do ponto de vista nutricional quanto econômico. No âmbito nutricional, é destacada como uma fonte significativa de fibras dietéticas, vitaminas essenciais, como a vitamina C e as do complexo B, além de minerais indispensáveis, como potássio, magnésio e cálcio. Seus compostos bioativos, especialmente os flavonoides e ácidos fenólicos, são propriedades benéficas à saúde, incluindo efeitos antioxidantes, hepatoprotetores e anti-inflamatórios, conforme evidenciado por **Souza (2013)**. Sob a perspectiva econômica, o cultivo da alcachofra desempenha papel crucial no estímulo a geração de empregos e fomentando o desenvolvimento socioeconômico de regiões produtoras, como salientado por **Rodrigues (2017)**.

A automação industrial tem um papel crucial na modernização dos processos de esterilização térmica, assegurando precisão e reprodutibilidade. A utilização de sensores inteligentes e algoritmos computacionais permite o monitoramento contínuo de variáveis críticas, como temperatura e tempo de exposição ao calor, reduzindo falhas operacionais e aumentando a eficiência do processo (**IDUGEL, 2023**). Além disso, a integração com sistemas em nuvem possibilita a gestão remota do processamento térmico, garantindo a rastreabilidade das informações e a implementação de ajustes em tempo real, tornando o controle microbiológico ainda mais robusto (**AGROSAFETY, 2022**).

Este estudo propõe o desenvolvimento e validação de um modelo computacional para otimizar a esterilização térmica do patê de alcachofra em autoclaves estacionárias, integrando monitoramento em nuvem e análise de letalidade térmica. A abordagem proposta busca não apenas assegurar a segurança microbiológica do produto, mas também modernizar o controle do processo, alinhando-se às exigências regulatórias e às diretrizes da Indústria 4.0. Ao adotar metodologias inovadoras e baseadas em inteligência digital, espera-se contribuir para a evolução dos processos térmicos na indústria alimentícia, promovendo maior segurança, eficiência e sustentabilidade.

1.1– OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral simular o comportamento da temperatura do patê de alcachofra acondicionado em embalagem metálica de geometria cilíndrica durante o processo de esterilização,

Entre os objetivos específicos, destacam-se:

- Estimar a temperatura no ponto mais interno do produto alimentício;
- Simular o comportamento dinâmico do processamento térmico imposto ao produto em estudo, utilizando análises computacionais;
- Calcular o valor da letalidade imposta ao microrganismo *Clostridium botulinum*;
- Testar a comunicação entre o aplicativo desenvolvido e a nuvem.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura que aborda o desenvolvimento histórico do controle de processos, o processo de enlatamento, as técnicas de modelagem matemática, bem como os conceitos de Indústria 4.0 e computação na nuvem. Além disso, foram discutidas estratégias de otimização e controle do processamento térmico de alimentos. Essas informações possibilitaram a definição da metodologia utilizada para alcançar os objetivos deste trabalho.

2.1. PATÊ DE ALCACHOFRA

O patê de alcachofra apresenta-se como um produto de elevado potencial gastronômico, combinando um perfil sensorial sofisticado com propriedades nutricionais altamente benéficas. A alcachofra (*Cynara scolymus L.*) é uma hortaliça originária da região do Mediterrâneo e do norte da África, cuja introdução no Brasil ocorreu por meio da imigração europeia, especialmente em localidades como São Roque, no estado de São Paulo (**RODRIGUES, 2017**). Além de sua ampla aceitação na culinária, a alcachofra é reconhecida por sua composição rica em compostos bioativos, incluindo polifenóis e flavonoides, que conferem propriedades

antioxidantes e hepatoprotetoras, promovendo benefícios à saúde humana **(BOTSARIS; ALVES, 2013)**.

A viabilidade de produção do patê de alcachofra é promissora, considerando a adaptabilidade da cultura a diferentes condições climáticas no Brasil e a crescente demanda dos consumidores por alimentos funcionais e saudáveis. No entanto, apesar do seu potencial, verifica-se uma lacuna significativa na literatura científica nacional no que se refere ao desenvolvimento tecnológico e à caracterização de produtos derivados da alcachofra, como o patê **(SOUZA, 2013)**. A maioria dos estudos concentra-se na análise de suas propriedades medicinais, enquanto aspectos fundamentais, como processamento industrial, conservação e aceitação sensorial, permanecem subexplorados. Essa ausência de pesquisas aplicadas limita o avanço do setor e dificulta a ampliação do portfólio de produtos disponíveis no mercado.

Dessa forma, a realização de pesquisas voltadas ao desenvolvimento tecnológico do patê de alcachofra não apenas amplia as possibilidades de diversificação do mercado alimentício, mas também contribui significativamente para o avanço do conhecimento científico sobre este produto. A escassez de estudos detalhados sobre o processamento e a conservação da alcachofra em formas inovadoras, como o patê, evidencia a necessidade de investigações mais aprofundadas **(RODRIGUES, 2017)**.

Nesse sentido, estudos voltados para a otimização dos processos produtivos, a avaliação da segurança microbiológica, é fundamental para garantir qualidade, segurança microbiológica e viabilidade industrial. Além disso, o aprofundamento científico sobre este alimento pode fortalecer sua aceitação no setor produtivo, assegurando um produto competitivo e alinhado às demandas crescentes por alimentos saudáveis, funcionais e sustentáveis **(BOTSARIS; ALVES, 2013)**.

O aprimoramento dessas diretrizes não apenas possibilita a consolidação do patê de alcachofra como uma alternativa inovadora e comercialmente viável, mas também fomenta o desenvolvimento de novos produtos baseados em ingredientes pouco explorados, ampliando as fronteiras da pesquisa aplicada à indústria de alimentos. Assim, este trabalho busca preencher essa lacuna, oferecendo um embasamento técnico e científico que possa subsidiar futuras iniciativas no setor, promovendo maior sustentabilidade e inovação no processamento de alimentos.

2.2. PROCESSAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS

Segundo **Leonhardt (2003)**, o processo de enlatamento – envasar alimentos em embalagens enlatadas - surgiu na França por volta de 1790. Naquele momento, a França estava em guerra e enfrentava grandes dificuldades para alimentar sua população. Outra problemática enfrentada foi a perda massiva de soldados por conta da má alimentação. Diante deste contexto, urgiu a necessidade de incentivo a agricultura e a indústria. Organizações como a Sociedade para o Encorajamento da Indústria Nacional e a Sociedade da Agricultura fizeram apelos em busca de metodologias de conservação de alimentos (**BITTING, 1937**).

Nicolas Appert, em 1800, iniciou pesquisas em busca de técnicas de preservação de alimentos. Em seus estudos observou que, ao aquecer os alimentos em recipientes fechados, desde que eles permanecessem lacrados, estes demoravam a apresentar indícios de deterioração (**APERT, 1810 *apud* LEONHARDT, 2003**). Para desenvolver um método de conservação Appert recebeu 12.000 francos do governo francês, sendo que a sua metodologia consistia em:

- Colocar o alimento em garrafas;
- Sellar as garrafas de forma cuidadosa;
- Aquecer as garrafas em banho-maria por tempos diferentes, conforme o tipo de alimento;
- Resfriar as garrafas após o aquecimento.

As pesquisas de Appert contribuíram para o desenvolvimento de metodologias de quantificação de tempo e temperatura de troca térmica que o alimento precisa permanecer para garantir sua preservação.

Complementando os estudos de **Appert, Teixeira e Balaban (1996)** em suas pesquisas sobre a degradação de alimentos, constataram que um problema agravante enfrentado pelo setor alimentício é o *Clostridium botulinum*, um microrganismo responsável por produzir uma toxina mortal que se desenvolve em alimentos com baixa acidez. O combate do mesmo é essencial para os avanços tecnológicos na indústria de alimentos.

2.3. ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS

O uso do calor como agente de esterilização microbiológica em alimentos é essencial para indústria alimentícia. Esse processo visa garantir a segurança e a estabilidade dos produtos alimentícios (**TOLEDO, 1994**). Ele objetiva eliminar os microrganismos que podem

representar riscos à saúde e que causem a deterioração dos alimentos, comprometendo sua qualidade (**LEONHARDT, 2003**).

A esterilização é um processo que visa exterminar microrganismos, incluindo aqueles em inatividade metabólica, como os esporos. Esporos bacterianos são capazes de sobreviver a temperaturas mais elevadas em comparação com as células vegetativas, o que torna sua eliminação o foco principal da esterilização. Uma vez que os esporos são destruídos, presume-se que as células vegetativas também tenham sido eliminadas, garantindo a segurança do alimento. O objetivo desse processo é permitir que o alimento seja armazenado por longos períodos de tempo sem riscos de desenvolvimento significativo de microrganismo e ausência de toxina botulínica (**TEIXEIRA; BALABAN, 1996**).

Assim sendo, a operação de esterilização é considerada a mais importante no processo produtivo, podendo ser realizada em equipamentos que operam de forma contínua ou descontínua. Segundo **Teixeira e Balaban (1996)**, cinco fatores principais influenciam esse processo:

- Natureza do produto alimentício, como pH, potencial redox e o nível de oxigênio presente;
- Condições de armazenamento após o tratamento térmico;
- Resistência térmica dos microrganismos ou esporos-alvo;
- Características de transferência de calor do alimento, como condutividade térmica, viscosidade, meio de aquecimento, modo de transferência de calor, tamanho e material da embalagem;
- Número inicial de microrganismos.

Neste estudo, é abordada a esterilização de alimentos utilizando autoclaves, que são vasos de pressão projetados para esse fim. As autoclaves podem ser estacionárias ou rotativas, verticais ou horizontais. Para o desenvolvimento desta dissertação, foi considerada uma autoclave estacionária, sem sistema de agitação, vertical e de operação descontínua (**GEDRAITE; LEONHARDT, 1997**).

2.4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CORPOS CILÍNDRICOS APLICADA AO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS ENLATADOS

Ao realizar a esterilização de um produto alimentício, observa-se que a temperatura interna do produto varia ao longo do tempo de aquecimento. A letalidade, ou seja, a eficácia na eliminação de microrganismos indesejáveis, pode ser calculada por meio de dois métodos principais. O primeiro é o método geral, que se baseia na integração gráfica da curva de letalidade em função do tempo. O segundo utiliza fórmulas predefinidas, onde os valores dos parâmetros, previamente tabulados e calculados, são inseridos em uma equação para determinar o tempo de processamento necessário ou a letalidade proporcionada pelo tratamento térmico.

Os cálculos envolvidos no processamento térmico podem tratar tanto da determinação experimental do tempo e temperatura requeridos para atingir uma letalidade preestabelecida quanto do cálculo teórico desses parâmetros (TOLEDO, 1994).

A equação diferencial parcial que modela a transferência de calor em um corpo cilíndrico sólido de altura H e raio R , considerando a difusividade térmica com a temperatura, é representada pela segunda lei da condução de calor de Fourier. Esta equação, expressa em coordenadas cilíndricas, é apresentada na Equação (2.1).

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

Onde T é a temperatura, t é o tempo, r é o raio, y é a altura, e $\alpha(T)$ é a difusividade térmica dependente da temperatura. Neste estudo, α é modelado pela função exponencial:

$$\alpha(T) = \alpha_0 e^{\alpha_1 T} \quad (2.2)$$

No contexto da equação apresentada, α_0 e α_1 são parâmetros da função exponencial que modela a dependência da difusividade térmica (α) em relação à temperatura (T). De acordo com a literatura, α_0 é o valor de referência da difusividade térmica quando a temperatura é zero. Já α_1 é o parâmetro de sensibilidade, que descreve como a difusividade térmica varia com a temperatura.

Segundo Çengel (2011), a condutividade térmica de diversos materiais apresenta um comportamento não linear em função da temperatura. Dessa forma, a formulação baseada em α variável torna-se mais realista do que a suposição α constante. Nesse contexto, os parâmetros α_0 e α_1 são determinados experimentalmente, permitindo uma representação mais precisa da difusividade térmica no processo de transferência de calor.

Uma das maneiras de se resolver a Eq. (2.1) é por meio da discretização baseada no balanço de energia para um ponto do conjunto embalagem/produto alimentício, denominado genericamente de nó I . Esse método considera a transferência de calor entre o nó I e seus nós vizinhos, representados por N (norte / superior), S (sul / inferior), L (leste / lateral), e O (oeste / externo). A equação que representa este balanço energético para um volume de controle pode ser expressa na Equação (2.3).

$$C_I \cdot \frac{dT_I}{dt} = G_{IN} \cdot (T_N - T_I) + G_{IS} \cdot (T_S - T_I) + G_{IL} \cdot (T_L - T_I) + G_{IO} \cdot (T_O - T_I) \quad (2.3)$$

Nesta equação, C_I representa a capacitância térmica do nó I , dada pela Equação (2.4).

$$C_I = \rho \cdot c_p \cdot V_I \quad (2.4)$$

A densidade (ρ), o calor específico, (c_p), e o volume do nó (V_I) são parâmetros fundamentais na modelagem da transferência de calor. As condutâncias térmicas (G_{IN} , G_{IS} , G_{IO} , G_{IL}) representam a taxa de transferência de calor entre os nós vizinhos e são influenciadas pela variabilidade térmica da difusividade $\alpha(T)$, sendo ajustadas para refletir essa dependência.

Uma alternativa para a resolução da equação diferencial consiste na aplicação do método dos volumes finitos (MVF), utilizando reconstrução polinomial. Em comparação com os esquemas tradicionais, essa abordagem permite capturar variações espaciais complexas da temperatura com maior precisão. Além disso, a utilização de malhas não estruturadas é particularmente vantajosa para a modelagem de domínios com geometrias cilíndricas, como aquelas presentes em alimentos enlatados (**BARBOSA, 2018**).

Dada a complexidade da equação diferencial apresentada, uma abordagem alternativa para sua solução é o método dos volumes finitos (MVF), que permite a discretização espacial por meio de reconstrução polinomial. Em comparação com os esquemas tradicionais, essa abordagem permite capturar variações espaciais da temperatura com maior precisão. Além disso, a utilização de malhas não estruturadas é vantajosa para a modelagem de domínios com geometrias cilíndricas, como aquelas presentes em alimentos enlatados (**BARBOSA, 2018**).

O MVF se baseia na formulação integral das equações diferenciais governantes, garantindo a conservação local das propriedades físicas. Essa metodologia é empregada em pacotes de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como *OpenFOAM* e *Fluent* (**VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007**). Neste estudo, o MVF foi implementado com reconstrução por

mínimos quadrados e quadratura gaussiana em malhas triangulares, conforme o trabalho iniciado por **Barth e Frederickson (1990)**.

2.5. *CLOSTRIDIUM BOTULINUM* : RISCOS MICROBIOLÓGICOS E A NECESSIDADE DO TRATAMENTO TÉRMICO

O *Clostridium botulinum* é uma bactéria anaeróbia obrigatória, formadora de esporos, amplamente distribuída no ambiente, especialmente em solos e sedimentos aquáticos (**ITAL, 2001**). Sua relevância para a saúde pública está associada à capacidade de produzir neurotoxinas extremamente potentes, responsáveis pelo botulismo, uma doença neuromuscular grave que pode ser fatal caso não seja diagnosticada e tratada precocemente (**GERMANO; GERMANO, 2011**). A ingestão da toxina botulínica bloqueia a liberação de acetilcolina nas terminações nervosas, resultando em paralisia muscular progressiva, afetando principalmente os músculos respiratórios, o que pode levar à insuficiência respiratória e à morte do indivíduo (**SOLOMON; LILLY, 2001**).

O *C. botulinum* é um bacilo Gram-positivo que se destaca por sua capacidade de formar esporos, uma característica que lhe confere elevada resistência a condições ambientais adversas (**GERMANO; GERMANO, 2011**). Diferentemente das formas vegetativas bacterianas, que são sensíveis ao calor e agentes químicos, os esporos de *C. botulinum* são altamente resistentes e podem sobreviver a temperaturas de 100°C por períodos prolongados, chegando a permanecer viáveis por mais de 16 horas em água fervente (**ITAL, 2001**). Essa resistência térmica acentuada representa um grande desafio na conservação de alimentos, especialmente na indústria de alimentos enlatados, onde a presença de esporos pode levar à germinação e consequente produção da toxina botulínica sob condições anaeróbicas adequadas (**SOLOMON; LILLY, 2001**).

A principal preocupação associada à contaminação de alimentos enlatados pelo *C. botulinum* está relacionada à possibilidade de germinação dos esporos e subsequente produção da toxina botulínica. Em ambientes anaeróbicos, com disponibilidade de nutrientes, atividade de água superior a 0,93 e pH acima de 4,5, os esporos podem se transformar em células vegetativas, iniciando a síntese e liberação da toxina (**GERMANO; GERMANO, 2011**). Por esse motivo, alimentos de baixa acidez, como vegetais enlatados, representam os produtos de maior risco, pois oferecem um meio propício à proliferação da bactéria. Como a toxina botulínica é inodora e insípida, sua presença nos alimentos dificilmente pode ser detectada sem

análises laboratoriais, o que reforça a necessidade de medidas preventivas rigorosas no processamento desses produtos **(ITAL, 2001)**.

Diante do risco representado pelo *C. botulinum*, o tratamento térmico adequado dos alimentos enlatados torna-se um requisito essencial para garantir a segurança microbiológica. Para produtos com pH acima de 4,5, a esterilização industrial deve ser realizada em autoclaves a temperaturas entre 115°C e 121°C, com tempos de processamento determinados a partir do cálculo do valor letalidade térmica (F_0), levando em consideração a resistência térmica dos esporos do microrganismo **(STUMBO, 1973)**. Esse tratamento térmico busca garantir uma redução populacional de esporos suficiente para evitar o risco de germinação e toxigênese, estabelecendo um nível de segurança aceitável para o consumo humano. Além disso, a letalidade térmica das toxinas botulínicas já sintetizadas deve ser considerada, uma vez que a toxina pode ser inativada a temperaturas de 80°C por um período de 10 a 30 minutos **(GERMANO; GERMANO, 2011)**.

No Brasil, a regulamentação da produção de alimentos enlatados é estabelecida pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), por meio da Resolução RDC nº 352, de 23 de dezembro de 2002, que trata das Boas Práticas de Fabricação para estabelecimentos produtores de conservas vegetais. Essa resolução enfatiza a necessidade de adoção de processos de esterilização térmica para eliminar microrganismos patogênicos e garantir a segurança microbiológica dos produtos enlatados **(BRASIL, 2002)**.

A presença potencial de *Clostridium botulinum* em alimentos enlatados representa um risco significativo para a saúde pública, considerando a gravidade do botulismo e a elevada resistência térmica dos esporos desse patógeno. Dessa forma, a implementação de processos de esterilização eficazes é fundamental para eliminar os esporos bacterianos e prevenir a produção de toxinas. A Resolução RDC nº 352/2002 da ANVISA estabelece diretrizes claras para assegurar que os alimentos enlatados sejam submetidos a tratamentos térmicos rigorosos antes de sua comercialização, reforçando a importância das Boas Práticas de Fabricação e dos controles de qualidade na indústria alimentícia. O cumprimento dessas normas é essencial para garantir a segurança dos consumidores e evitar surtos de botulismo associados ao consumo de produtos contaminados.

2.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTROLE REGULATÓRIO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS

No processo de esterilização de alimentos enlatados é imprescindível que o processamento térmico seja rigorosamente controlado. Esse controle é realizado por meio de uma malha de controle de realimentação da temperatura da autoclave (**NASCIMENTO, 2016**). A principal característica dessa malha é a medição da variável controlada, comparando-a com o valor desejado (*set point*). Ao ocorrer um desvio entre os valores medidos e o valor de referência, o controlador ajusta uma variável de processo que influencia a variável controlada, a fim de mantê-la no valor adequado.

Em condições normais de operação o sistema de controle utiliza dispositivos de registro de temperatura, garantindo o desempenho satisfatório do processo. Em situações anômalas, nas quais a quantidade de vapor de água fornecida não seja suficiente para manter a temperatura desejada, ocorrem desvios no processo. Nesses casos, medidas devem ser implementadas, o uso de dispositivos de alarme integrados ao sistema de controle da autoclave, exige a correção dos desvios de forma manual (**NASCIMENTO, 2016**). A implementação de sistemas digitais também facilitou a adoção de indicadores biológicos com tempos de leitura mais rápidos, aumentando a eficiência e a segurança dos processos de esterilização. Esses avanços tecnológicos refletem a contínua busca por melhorias na indústria alimentícia, visando produtos mais seguros e de maior qualidade para os consumidores (ASP, 2020).

De acordo com **Larousse e Brown (1997)**, alguns fabricantes desenvolveram no passado um conjunto de instruções para operadores de autoclaves, detalhando as ações corretivas a serem adotadas com base em estudos de penetração de calor no produto, para diferentes tipos de desvios. Esses estudos, entretanto, são trabalhosos, demorados e requerem recursos e conhecimento tecnológico especializado. Como esses pré-requisitos nem sempre estão disponíveis, optou-se por buscar uma solução por meio de um sistema de controle capaz de detectar pequenos desvios no processo, mesmo durante curtos períodos, e executar automaticamente a correção necessária, sem a intervenção manual do operador no controle da autoclave.

A evolução tecnológica no setor alimentício tem levado à implementação de sistemas automatizados de controle de temperatura em autoclaves, visando aprimorar a eficiência e a segurança dos processos de esterilização. Atualmente, autoclaves modernas são equipadas com sistemas de controle automático que monitoram e ajustam continuamente os parâmetros de

temperatura e pressão durante o ciclo de esterilização. Esses sistemas utilizam sensores avançados e algoritmos de controle para detectar e corrigir rapidamente quaisquer desvios, garantindo a consistência e a eficácia do processo (BERTO; VITALI, 2008).

2.7. ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS

Para garantir a segurança microbiológica e a eficiência produtiva é necessário a otimização do processo de esterilização de alimentos. De acordo com Larousse e Brown (1997), utilizar a temperatura do meio de aquecimento para estimar a temperatura do produto, é uma das abordagens preferidas na indústria, uma vez que dispensa a necessidade de determinar diretamente a temperatura no produto e permite o controle preciso dos processos contínuos e por batelada.

Entretanto, para que essa estratégia seja eficaz, é necessário o uso de modelos matemáticos que descrevam com precisão a transferência de calor. Além disso, a precisão do monitoramento térmico influencia diretamente na qualidade final do produto. Com o avanço da tecnologia, essa abordagem evoluiu significativamente, permitindo a transição de sistemas analógicos para digitais, o que possibilitou maior precisão na predição da letalidade acumulada (F_0) e no controle do processo de esterilização.

Ismail *et al.* (2013), afirmaram que a uniformidade da temperatura dentro das autoclaves é essencial para assegurar que todos os recipientes atinjam os parâmetros necessários para a esterilização efetiva. Nesse sentido, pequenas variações na temperatura podem impactar a eficiência do processo, tornando o uso de sensores e simulações computacionais cada vez mais relevante. A realização de testes de distribuição de temperatura colabora para garantir a segurança dos alimentos, uma vez que modelos matemáticos permitem simular a distribuição de temperatura no interior da embalagem, otimizando o tempo e a temperatura necessários para eliminar microrganismos, como o *Clostridium botulinum*. Assim, se tornando uma ferramenta importante para o monitoramento e ajuste contínuo do processo de esterilização, resultando em maior eficiência e confiabilidade do processo.

Outro ponto a ser mencionado é que simulações regulares, realizadas periodicamente a cada seis meses, como sugerido pelos autores, garantem que a autoclave mantenha a uniformidade térmica em seu interior, reduzindo falhas no processo e aumentando a confiança no produto final. A calibração dos equipamentos também se mostra essencial para garantir que as medições realizadas reflitam com precisão as condições reais do processo de esterilização.

Este procedimento favorece o emprego de ajustes precisos, que contribuem para garantir os níveis de segurança exigidos pela indústria de alimentos (**ISMAIL *et al.*, 2013**).

A estratégia de otimização do processo de esterilização envolve, portanto, o uso de testes de distribuição de temperatura, modelagem e simulação do comportamento térmico dos alimentos. **Miranda-Zamora *et al.* (2022)** destacaram que essas ferramentas são essenciais para a redução do tempo de processamento e do consumo de energia, sem comprometer a segurança microbiológica do produto. Adicionalmente, as simulações auxiliam na identificação de falhas no sistema, como problemas em trocadores de calor ou obstruções, conforme relatado por **Ismail *et al.* (2013)**, tornando o processo mais eficiente e aumentando a produtividade.

Em síntese, a simulação permite ajustes precisos nos parâmetros de esterilização, garantindo que todas as partes do alimento atinjam a letalidade necessária. Embora desafios como o controle de variáveis sejam uma realidade, **Miranda-Zamora *et al.* (2022)** enfatizaram a importância da aplicação de modelos matemáticos para otimizar o tratamento térmico de alimentos, assegurando qualidade e segurança. Dessa forma, a adoção de metodologias inovadoras e a integração de tecnologias de monitoramento térmico tornam-se fundamentais para elevar a confiabilidade dos processos industriais. A continuidade desses estudos é fundamental para o progresso da indústria alimentícia, permitindo maior eficiência e economia de recursos.

2.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE SENSORES VIRTUAIS NO CONTROLE DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE PRODUTO ALIMENTÍCIO INDUSTRIALIZADO

Mittal (1997) aborda em seu trabalho que com o advento da globalização e aumento de consumo impulsionaram a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias de controle de processo produtivo. Segundo ele, a automação tornou-se indispensável para atender à demanda por produtos industrializados, permitindo maior controle sobre a qualidade e segurança dos alimentos. A digitalização dos processos industriais tem desempenhado um papel crucial na redução de variáveis operacionais e na maximização da eficiência produtiva.

Outro benefício significativo da automação é a redução de custos operacionais, como a diminuição da necessidade de mão de obra e a redução de perdas no processo produtivo (**BERTO; VITALI, 2008**). O emprego de sensores inteligentes contribui diretamente para esse cenário, fornecendo dados em tempo real e permitindo correções imediatas quando necessário.

Isso promove eficiência e otimização de recursos, possibilitando o aumento do volume de produção.

Atualmente, as fábricas modernas buscam integrar tecnologias para automatizar e otimizar processos produtivos, o que se tornou um fator determinante para aumentar a competitividade industrial. A implementação de sensores no processo fabril, especialmente os sensores virtuais, possibilita às indústrias alcançar um aumento na produtividade e qualidade, refletindo diretamente no crescimento e na sustentabilidade operacional (**BERTO; VITALI, 2008**).

De acordo com **Boehler et al. (2021)** a utilização de sensores virtuais no controle do processo de esterilização representa uma inovação significativa, garantindo maior confiabilidade e precisão dos dados. O monitoramento contínuo dos parâmetros críticos, como temperatura e pressão, pode ser realizado de forma remota, reduzindo a necessidade de intervenção humana direta no ambiente industrial. Esse avanço permite o controle do processo sem a necessidade de medição direta, reduzindo custos operacionais e garantindo maior confiabilidade, segurança e eficiência.

No estudo de **Vahidpour et al. (2022)**, o emprego de uma plataforma multissensorial *on-line* foi essencial para monitoramento e controle dos parâmetros críticos no processo de esterilização de embalagens de alimentos com peróxido de hidrogênio gasoso (H_2O_2). A utilização dos sensores permitiu a validação do processo, ao fornecer dados em tempo real sobre variáveis como temperatura, fluxo de gás, concentração e umidade. Esses sensores desempenharam um papel crucial na definição das condições ideais para a esterilização, reduzindo a necessidade de métodos tradicionais de validação, como testes microbiológicos.

Em síntese, conforme mencionado por **Pech, Vrchota e Bednář (2021)**, a utilização de sensores no ambiente industrial não apenas viabiliza o aumento da produção, mas também contribui para a rastreabilidade e a melhoria da gestão de processos. Além disso, o uso de sensores inteligentes integrados à computação na nuvem proporciona maior flexibilidade operacional, facilitando a padronização de processos e a tomada de decisões baseada em dados precisos.

2.9. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONCEITO DE INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 desenvolveu-se inicialmente na Alemanha. Diante da necessidade de modernizar seu setor fabril e impulsionar a produtividade industrial, o governo alemão

implementou estratégias para fomentar a inovação tecnológica e a automação dos processos de manufatura. Com a colaboração de universidades e empresas, em 2011, durante a Feira de Hannover, foi apresentado o conceito de fábricas inteligentes, marcando o surgimento da Indústria 4.0. Essa nova abordagem foi sendo adotada gradualmente, incorporando tecnologias como a integração de sensores, conectividade em tempo real e automação dos processos produtivos. Além disso, soluções baseadas em inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), *Big Data* e computação na nuvem passaram a ser utilizadas, possibilitando maior eficiência e controle na produção industrial (RÜBMANN *et al.*, 2015).

A incorporação de novas tecnologias possibilita o desenvolvimento de produtos com maior valor agregado, aumentando a competitividade e expansão dos negócios. Consequentemente, a Indústria 4.0 vem chamando atenção de diversos países que buscam promover o desenvolvimento econômico (RÜBMANN *et al.*, 2015). Nos Estados Unidos, foi criada a *Advanced Manufacturing* com o objetivo de desenvolver tecnologias semelhantes, na França o governo lançou o programa *La Nouvelle France Industrielle*. Em países emergentes como China o governo desenvolveu o *Made in China 2025*, com a finalidade de adaptar o país a vigente Revolução Industrial (LIAO *et al.*, 2017).

No Brasil, a iniciativa "Rumo à Indústria 4.0", lançada em 2017 pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), teve como objetivo modernizar e aumentar a competitividade do setor industrial. A proposta envolveu a adoção de tecnologias digitais, tais como IoT, inteligência artificial, *Big Data* e robótica, com o intuito de otimizar processos produtivos e tornar a indústria nacional mais competitiva no cenário global. Entretanto, a implementação dessas tecnologias no Brasil ainda enfrenta desafios significativos, como a falta de infraestrutura adequada e o baixo nível de conhecimento técnico sobre a Indústria 4.0. Assim, o sucesso da iniciativa dependerá da superação dessas barreiras, que incluem investimentos em capacitação profissional, políticas públicas de incentivo à inovação e melhorias na infraestrutura tecnológica do país (ABDI, 2017).

Portanto, a Indústria 4.0 representa uma nova revolução industrial, que vai além da simples implementação de tecnologias emergentes. Seu impacto envolve transformações estruturais, exigindo mudanças na infraestrutura das indústrias, requalificação da mão de obra e adaptação dos modelos de negócio. Dessa forma, a transição para essa nova realidade demanda esforços conjuntos entre governos, empresas e instituições de ensino, visando garantir que as empresas possam se adaptar e se beneficiar plenamente das inovações tecnológicas propostas pela Indústria 4.0.

2.10 CONSIDERAÇÕES SOBRE COMPUTAÇÃO NA NUVEM

Um fator crucial para o desenvolvimento de uma produção industrial inteligente é a integração de dispositivos à nuvem, permitindo a conectividade e o gerenciamento eficiente de dados em tempo real. De acordo com **Grigoriou e Fink (2022)**, a computação na nuvem é fundamental para a Indústria 4.0, pois permite que empresas adotem soluções mais ágeis, acessíveis e escaláveis, facilitando a digitalização dos processos produtivos e a redução de custos operacionais.

A computação em nuvem é uma tecnologia que utiliza servidores virtuais e/ou físicos, disponibilizados por meio da internet. Com o avanço da industrialização e o crescente volume de dados gerados nos processos produtivos, tornou-se essencial adotar sistemas mais robustos, capazes de processar e armazenar grandes quantidades de informações de forma eficiente. Os *hardwares* tradicionais, como servidores físicos, possuem vida útil limitada e demandam manutenção periódica, tornando-se obsoletos com o avanço tecnológico. Nesse contexto, a computação em nuvem surgiu como uma alternativa eficiente, permitindo que empresas armazenem seus dados em servidores externos, garantindo maior segurança, escalabilidade e flexibilidade (**RODRIGUES; GALDINO; ANTUNES NETO, 2019**).

Moosavi, Bakhshi e Martek (2021) analisaram o impacto da computação em nuvem durante a pandemia de COVID-19 e observaram que o setor industrial passou a reconhecer a importância do controle e da manipulação de dados fora do ambiente físico das fábricas. Nesse período, tornou-se evidente a necessidade de acelerar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, demonstrando que a flexibilidade e a escalabilidade proporcionadas pela computação na nuvem são essenciais para garantir a resiliência dos processos produtivos em momentos de crise. Portanto, a computação na nuvem não se limita à modernização da indústria, mas também desempenha um papel crucial na capacidade de adaptação a cenários de incerteza e desafios operacionais.

A computação na nuvem tem sido amplamente discutida como um dos pilares da Indústria 4.0, oferecendo soluções para otimização da manufatura e automação industrial. **Villalobos et al. (2020)** apontaram que o uso de dispositivos inteligentes e sistemas automatizados levará a um aumento exponencial na geração de dados, exigindo estratégias avançadas para o armazenamento e a gestão dessas informações. Dessa forma, o armazenamento na nuvem surge como uma solução altamente eficiente e econômica,

permitindo que as indústrias administrem grandes volumes de dados sem a necessidade de infraestrutura local complexa.

O armazenamento na nuvem possibilita a integração com ferramentas de *Big Data*, garantindo uma administração eficaz dos dados industriais sem comprometer sua usabilidade para análises futuras. A combinação entre computação na nuvem e *Big Data* permite a obtenção de *insights* estratégicos, otimizando a tomada de decisões e promovendo melhorias contínuas nos processos produtivos. Como resultado, observa-se a redução de custos operacionais, a melhoria no desempenho das operações industriais e o aumento da eficiência geral das fábricas (VILLALOBOS *et al.*, 2020).

Em síntese, conforme Grigoriou e Fink (2022), a computação na nuvem democratiza o acesso a tecnologias de ponta, permitindo que pequenas e médias empresas adotem soluções inovadoras sem a necessidade de altos investimentos em infraestrutura física. Essa acessibilidade torna a computação em nuvem uma ferramenta estratégica para a modernização da indústria, oferecendo vantagens significativas em termos de custo-benefício, segurança e controle dos processos produtivos.

2.10.1. CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DA COMPUTAÇÃO NA NUVEM

Veras (2015), em seu estudo, abordou algumas características essenciais da computação na nuvem, fundamentais para assegurar flexibilidade, eficiência e escalabilidade nos serviços oferecidos. A implementação dessa tecnologia possibilita maior controle sobre os dados, facilitando o acesso remoto, a automação de processos e a otimização da infraestrutura tecnológica, sem a necessidade de investimentos elevados em *hardware* físico.

Entre essas características, destaca-se o autoatendimento sob demanda, o qual permite aos usuários ajustar recursos computacionais, como armazenamento e capacidade de processamento, de maneira autônoma e instantânea, sem a necessidade de intervenção do provedor. Essa funcionalidade proporciona maior autonomia às empresas, permitindo a adaptação dos sistemas conforme suas demandas operacionais e evitando desperdícios de recursos (SOUSA; MOREIRA; MACHADO, 2009).

Veras (2015) enfatiza que outra característica essencial da computação na nuvem é o acesso à rede, garantindo que os serviços estejam disponíveis para todos os dispositivos

conectados à Internet. Esse aspecto possibilita o acesso remoto aos dados a partir de qualquer localidade, independentemente do dispositivo utilizado, o que amplia a mobilidade e facilita a gestão de operações em múltiplos ambientes industriais.

O *pool* de recursos é também um elemento fundamental da computação em nuvem, pois os recursos computacionais do provedor são organizados e distribuídos dinamicamente conforme a demanda dos usuários. Essa alocação inteligente permite que a indústria ajuste sua capacidade computacional de acordo com o volume de produção, otimizando custos e maximizando a eficiência (SOUSA; MOREIRA; MACHADO, 2009).

A elasticidade rápida é outra característica essencial, pois possibilita a alocação e liberação de recursos computacionais de forma ágil e conforme a necessidade. Esse aspecto é crucial para setores industriais que exigem infraestrutura flexível, garantindo que os recursos estejam disponíveis em períodos de pico de produção e reduzindo custos operacionais em momentos de menor demanda. Outro fator relevante é a eficiência financeira, permitindo que as empresas paguem apenas pelos recursos utilizados, evitando gastos desnecessários e otimizando os investimentos em tecnologia (VERAS, 2015).

Por fim, os serviços mencionados proporcionam transparência na utilização dos recursos computacionais. Esse monitoramento permite um controle preciso dos custos, garantindo que os usuários tenham total visibilidade sobre o consumo de dados e processamento. Além disso, os provedores de serviços em nuvem podem otimizar a alocação de recursos, oferecendo preços mais justos e baseados no consumo real (SOUSA; MOREIRA; MACHADO, 2009).

2.10.2. MODELOS E SERVIÇOS

Os modelos e serviços de computação na nuvem referem-se à maneira como os recursos de Tecnologia da Informação (TI), como servidores, armazenamento, aplicativos e redes, são disponibilizados aos usuários por meio da internet. Essa abordagem permite atender a diferentes demandas industriais, especialmente no que se refere à automação e otimização dos processos produtivos. Os serviços em nuvem são comumente classificados em três camadas principais: Infraestrutura como Serviço (IaaS), Plataforma como Serviço (PaaS) e Software como Serviço (SaaS) (SOUSA; MOREIRA; MACHADO, 2009).

A Infraestrutura como Serviço (IaaS) fornece ao usuário a infraestrutura computacional básica, incluindo servidores, armazenamento e redes, eliminando a necessidade de

investimentos em equipamentos físicos próprios. Esse modelo possibilita a criação de ambientes personalizados para testes e simulações, tornando-se ideal para indústrias que necessitam processar grandes volumes de dados, automatizar operações e ajustar seus recursos computacionais conforme a demanda. Além disso, a flexibilidade oferecida pelo IaaS permite a rápida escalabilidade dos recursos, tornando-o uma solução vantajosa para setores que enfrentam picos de demanda periódicos. Exemplos amplamente utilizados desse serviço incluem *Amazon Web Services (AWS)*, *Google Cloud* e *Microsoft Azure* (SHUKUR *et al.*, 2020).

A Plataforma como Serviço (PaaS) representa um nível mais avançado de abstração, disponibilizando um ambiente pronto para o desenvolvimento, teste e implementação de aplicações. Dessa forma, os desenvolvedores podem focar exclusivamente no código e na inovação, sem a necessidade de gerenciar a infraestrutura subjacente. Essa camada inclui ferramentas integradas para colaboração, bancos de dados, servidores e sistemas operacionais, otimizando o ciclo de vida do desenvolvimento de *software*. Como resultado, o PaaS reduz significativamente o tempo de implementação e os custos operacionais, delegando a responsabilidade da manutenção da infraestrutura ao provedor de serviços. Um exemplo desse modelo é o *Google Cloud Platform*, amplamente utilizado para o desenvolvimento de aplicativos baseados na nuvem (SHUKUR *et al.*, 2020).

Por fim, o Software como Serviço (SaaS) disponibiliza softwares prontos para uso diretamente na nuvem, sem a necessidade de instalação, manutenção ou atualizações manuais. Essa solução permite que empresas utilizem aplicações especializadas para gestão e controle de processos, sem precisar alocar recursos para suporte técnico ou infraestrutura própria. As ferramentas SaaS podem abranger desde *softwares* de produtividade até sistemas de gerenciamento empresarial, sendo amplamente adotadas em diversos setores industriais. Exemplos populares desse modelo incluem *Salesforce* e *Google Workspace* para gestão de processos, além de *Google Drive* e *Dropbox* para armazenamento de arquivos (SHUKUR *et al.*, 2020).

Cada um dos modelos de computação em nuvem oferece diferentes níveis de controle sobre a infraestrutura de TI, permitindo que as empresas se adaptem às suas necessidades específicas. A escolha do modelo ideal depende do grau de automação desejado, dos recursos disponíveis e da complexidade das operações empresariais. A adoção dessas tecnologias contribui para um sistema produtivo mais eficiente, garantindo maior flexibilidade,

escalabilidade e redução de custos operacionais. Dessa forma, a computação na nuvem tornou-se um elemento essencial para a modernização e competitividade da Indústria 4.0 (SOUSA; MOREIRA; MACHADO, 2009).

2.11. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZADA

Neste subitem, apresenta-se uma revisão da literatura que compila informações sobre o desenvolvimento e a aplicação de métodos de validação de processos de esterilização, monitoramento térmico e integração de dados na nuvem. Essas tecnologias podem facilitar o armazenamento e a análise de dados, promovendo a colaboração entre pesquisadores e otimizando os resultados experimentais.

Nascimento (2016) desenvolveu um sistema de monitoramento em tempo real para avaliar o processo de esterilização térmica de alimentos enlatados. O produto analisado foi uma sopa concentrada, enlatada em embalagens de 3 kg. Por meio de um modelo bidimensional baseado na técnica de elementos finitos, foi realizado o cálculo da destruição térmica de microrganismos, considerando o *Geobacillus stearothermophilus* como microrganismo de referência. A pesquisa envolveu a implementação de um controlador lógico programável (CLP), sensores de temperatura, um software supervisor e um computador para monitorar e controlar o processo de esterilização térmica em tempo real.

Para validar o experimento, **Nascimento (2016)** realizou comparações entre as leituras dos sensores e valores de referência, garantindo a precisão das medições. Durante os ciclos de esterilização monitorados, foi realizada a inoculação do microrganismo *Geobacillus stearothermophilus*. O monitoramento foi gerenciado por um *software* supervisor programado para calcular a letalidade térmica, utilizando o modelo desenvolvido pelo autor.

Kumar et al. (2022) elaboraram um estudo bibliográfico sobre o monitoramento de processos industriais utilizando a computação na nuvem. Os autores constataram que a integração de dados na nuvem tem se mostrado uma ferramenta essencial para o gerenciamento de processos, permitindo a otimização das operações industriais, a redução de custos e o aumento da eficiência operacional. Contudo, eles ressaltaram que a implementação dessa tecnologia apresenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito ao planejamento adequado e à migração de dados e sistemas entre diferentes plataformas tecnológicas.

Gill e Hevary (2022) realizaram uma revisão de literatura com o objetivo de identificar os principais desafios enfrentados no monitoramento de dados em ambientes de computação na nuvem, especificamente em sistemas de CPU virtualizados. Os pesquisadores identificaram cinco categorias principais de desafios: tecnologia de monitoramento, virtualização, consumo de energia, disponibilidade de serviços e desempenho computacional.

As tecnologias de monitoramento e virtualização foram classificadas como os maiores desafios na área. Os autores enfatizaram a necessidade de desenvolver padrões tecnológicos robustos e estratégias eficientes de virtualização para lidar com a complexidade dos ambientes heterogêneos em nuvem. Como solução alternativa, **Gill e Hevary (2022)** sugerem a utilização de ferramentas avançadas de monitoramento, capazes de identificar e corrigir problemas de desempenho em tempo real.

Além disso, o uso de *Big Data analytics* é apontado como um recurso essencial para a análise do grande volume de dados gerado em ambientes industriais de larga escala. A aplicação dessa tecnologia pode proporcionar melhorias significativas no processamento e interpretação de dados, permitindo a tomada de decisões mais precisas e estratégicas.

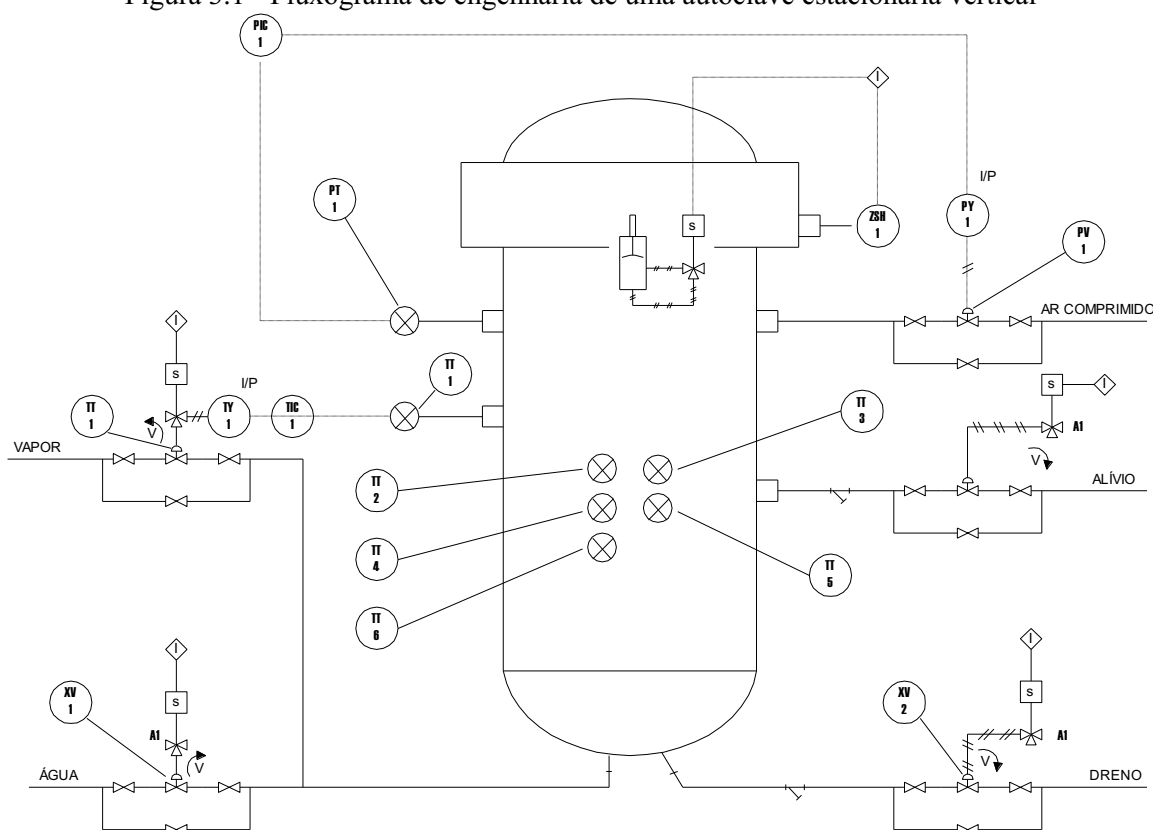
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve a unidade experimental utilizada por **Gedraite (1999)**, a qual foi a base para a execução deste estudo, juntamente com a fundamentação empregada para o desenvolvimento do modelo matemático. A variável analisada foi a temperatura no ponto mais interno do conjunto embalagem/produto alimentício testado, levando em conta o processo utilizado na esterilização de alimentos embalados em recipientes metálicos de formato cilíndrico.

3.1. AUTOCLAVE UTILIZADA

O sucesso da esterilização depende essencialmente do controle preciso da temperatura à qual o alimento será exposto, assim como do tempo de exposição (**Berteli *et al.*, 2013**). A malha de controle de temperatura da autoclave utilizada por **Gedraite (1999)** é ilustrada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma de engenharia de uma autoclave estacionária vertical



Fonte: GEDRAITE (1999)

A autoclave utilizada tem o início do funcionamento na etapa de exaustão, cuja principal função é remover o ar presente no interior do equipamento. A cronometragem do tempo de

exaustão e do período em que a temperatura era mantida para a eliminação de microrganismos foi realizada por meio de um controlador lógico programável. Após atingir a esterilização requerida, o resfriamento era iniciado por meio da injeção de água potável à temperatura ambiente no equipamento. Nesta fase, o controle da pressão interna era fundamental para evitar danos às embalagens dos alimentos (GEDRAITE, 1999). O controle de pressão regula o fluxo de ar comprimido após a etapa de aquecimento, conforme ilustrado na Figura 3.1.

O controle da temperatura e da pressão foi realizado por um controlador eletrônico microprocessado, capaz de gerenciar simultaneamente até quatro sistemas de controle. A autoclave estava equipada com um sistema de segurança, operado por um controlador lógico programável que impedia a partida da autoclave caso a tampa não estivesse devidamente travada, além de bloquear sua abertura caso a pressão interna fosse superior à pressão atmosférica (GEDRAITE, 1999).

Além disso, a autoclave estava dotada de sensores de temperatura extras, que podiam ser colocados nas embalagens de alimentos para medir a curva de penetração de calor durante o processo. Por fim, foram utilizados transmissores eletrônicos microprocessados para medir a pressão e a temperatura, garantindo maior precisão e confiabilidade nas medições (GEDRAITE, 1999).

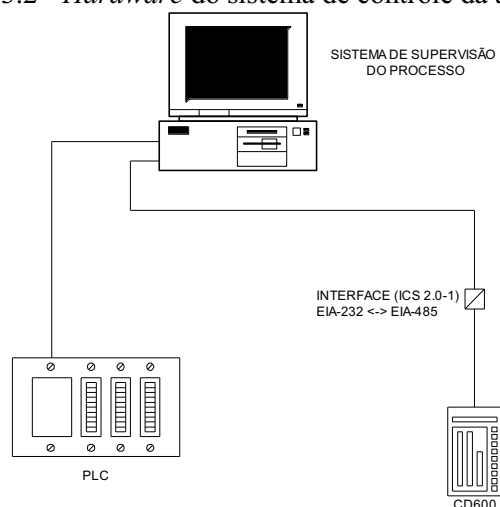
A autoclave utilizada nos experimentos estava equipada com um sistema de controle totalmente digital, composto por um controlador eletrônico microprocessador e um controlador lógico programável (GEDRAITE, 1999).

Ambos conectados a um computador pessoal que executava um *software* supervisor, que permitia o monitoramento do processo por meio de telas gráficas previamente configuradas. Na Figura 3.2 é apresentada uma representação simplificada do *hardware* empregado no sistema de controle da autoclave vertical estacionária, que constituiu o objeto de estudo (GEDRAITE, 1999).

3.2. FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE

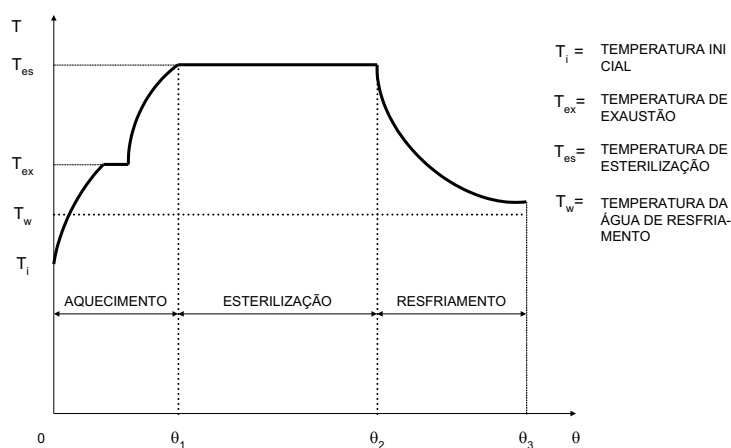
O sistema de controle da autoclave desempenhava um papel fundamental na definição do perfil de temperatura requerido ao longo do processo de esterilização. Esse perfil é tradicionalmente dividido em três fases principais: aquecimento, esterilização e resfriamento, conforme ilustrado na Figura 3.3.

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



Fonte: GEDRAITE (1999)

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



Fonte: LEONHARDT (2003)

Na Figura 3.3 é apresentado o perfil típico de temperatura da autoclave, mostrando as transições entre as fases de aquecimento, esterilização e resfriamento. Esse processo automatizado garante não apenas a eficácia da esterilização, mas também a integridade das embalagens e a qualidade final do produto alimentício, ao seguir um controle rigoroso de variáveis como temperatura e pressão.

A fase inicial de aquecimento considerava a etapa de exaustão, cuja função é remover o ar presente no interior da autoclave. A eliminação completa do ar é fundamental, pois sua permanência pode agir como um isolante térmico, prejudicando a transferência de calor e podendo causar danos por corrosão às embalagens (LEONHARDT, 2003). Nessa etapa, o ar

era substituído por vapor de água saturado, que permitia um aquecimento mais eficiente por apresentar um elevado coeficiente de transferência de calor.

Durante a etapa de exaustão, a circulação do vapor deve ser intensa, a fim de compensar a condensação inicial que ocorre nas superfícies das embalagens, que ainda estão a temperaturas inferiores à de saturação do vapor. Além disso, é essencial que a válvula de exaustão permaneça aberta para que o ar seja completamente removido, o que garante a uniformidade térmica dentro da autoclave. Uma vez atingida a temperatura recomendada para a exaustão, essas condições devem ser mantidas por um período determinado experimentalmente, assegurando a remoção eficaz do ar (LEONHARDT, 2003).

O sistema de controle de temperatura da autoclave gerencia automaticamente a abertura e o fechamento da válvula de controle de vapor, ajustando a vazão de vapor de aquecimento. Durante essa etapa, cuidados adicionais incluem a manutenção da temperatura da autoclave cerca de 1°C acima da recomendada para compensar variações e a verificação constante do escoamento do condensado, o que é feito através de uma tubulação equipada com um purgador de condensado.

A fase final de resfriamento é conduzida sob pressão controlada, utilizando a vazão da água de resfriamento e o ar comprimido para manter a pressão interna. O fornecimento de vapor é interrompido e a autoclave é preenchida com água de resfriamento até o topo, mantendo a pressão constante para evitar danos às embalagens. Dependendo do tipo de produto processado, a redução da pressão é feita de forma controlada, com base em taxas específicas de relaxamento, que variam conforme o método de aquecimento (convecção ou condução) (LEONHARDT, 2003).

3.3. METODOLOGIA

3.3.1. MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO

O modelo matemático escolhido para estudo nesta dissertação de mestrado foi baseado na discretização do conjunto embalagem/produto em elementos de volume isotérmicos (BARBOSA, 2021). A resolução da equação diferencial correspondente a este modelo é apresentada na sequência.

Uma etapa importante no processo de identificação de parâmetros é a resolução da equação diferencial associada ao fenômeno - Equação (3.1). Vários métodos estão disponíveis na literatura para resolução de equações diferenciais parciais. No entanto, de acordo com

Vincent e Jameson (2011), a maioria dos métodos para resolução de equações diferenciais parciais (EDP) oferecem precisão espacial da ordem de dois. Esses métodos são amplamente utilizados em academias e indústrias porque são intuitivos, fáceis de implementar e apresentam resultados com precisão considerável para muitos problemas de fluxo. Além disso, eles formam a base para todos os softwares comerciais de resolução de problemas de fluxo de fluidos. No entanto, no contexto da identificação de parâmetros, quanto maior a ordem de precisão dos métodos numéricos utilizados no processo de identificação de parâmetros, menor o erro embutido nos parâmetros a serem identificados.

A principal vantagem do método de discretização espacial utilizado neste trabalho é a versatilidade, pois uma vez implementado, ele pode resolver qualquer equação diferencial de ordem n , sendo n qualquer número natural maior ou igual a três. Outra vantagem é que o método utilizado discretiza o domínio através de uma malha não estruturada de triângulos, o que torna o método mais versátil para equações definidas em geometrias espaciais de maior complexidade que sejam sólidos de revolução e tenham simetria azimutal. A principal desvantagem na utilização deste método é sua dificuldade de implementação, considerando que o uso de malhas não estruturadas requer a geração e armazenamento de uma estrutura de dados inteira para identificar os volumes de controle na malha (**Van Altena, 1999**).

Alguns autores já trabalharam com a discretização espacial de EDP usando o método de volumes finitos com reconstrução de alta ordem em malhas não estruturadas. Entretanto, para o caso bidimensional, apenas os sistemas de coordenadas cartesianas foram estudados. Este trabalho usa uma adaptação deste método para o sistema de coordenadas cilíndricas nas dimensões radial e axial, r e z , respectivamente.

O método dos volumes finitos com reconstrução de alta ordem consiste em descrever espacialmente a função desconhecida T_i no volume de controle i por meio de uma expansão em série de Taylor, fixando o tempo t_j (para $j = 1, 2, \dots, m$), sendo m o número de pontos discretizados no domínio temporal, conforme a Equação 3.1 (**Santana, 2007**), onde (r_i, z_i) são as coordenadas do centroide do i -ésimo volume de controle (triângulo), $T_i^R(t_j, r, z)$ é a solução reconstruída para um instante de tempo t no i -ésimo volume de controle e $\left. \frac{\partial^{k+1} T}{\partial r^k \partial z} \right|_i$ são as derivadas parciais de T avaliadas no centroide do i -ésimo volume de controle.

$$\begin{aligned}
T_i^R(t_j, r, z) = & T|_i + \frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_i (r - r_i) + \frac{\partial T}{\partial z}\bigg|_i (z - z_i) + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\bigg|_i (r - r_i)^2 \\
& + \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial z}\bigg|_i (r - r_i)(z - z_i) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\bigg|_i (z - z_i)^2 + \dots
\end{aligned} \tag{3.1}$$

A abordagem para obter a solução reconstruída foi adaptada de **Van Altena (1999)** e **Michalak (2009)** para a realidade de uma geometria cilíndrica.

Uma das essências do método dos volumes finitos é a utilização da formulação integral da equação diferencial, portanto, retornando à Equação (3.1) e integrando ambos os membros da equação no volume de controle V_i , tem-se a Equação (3.2).

$$\iiint_{V_i} \frac{\partial T}{\partial t} dV = \iiint_{V_i} \nabla \cdot (\alpha \nabla T) dV \tag{3.2}$$

Dividindo ambos os membros da Equação (3.2) por V_i , lembrando que $V_i = \iiint_{V_i} r dr d\theta dz$, e troca a derivada temporal com a integral de volume, obtém-se a Equação (3.3).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{V_i} \iiint_{V_i} T dV \right) = \frac{1}{V_i} \iiint_{V_i} \nabla \cdot (\alpha \nabla T) dV \tag{3.3}$$

O termo entre parênteses na Equação (3.3) é a definição do valor médio da temperatura no volume de controle i ($\bar{T}_i$). Como o polinômio de reconstrução, e consequentemente o coeficiente de difusão α , não depende da variável θ , é possível reescrever o segundo membro por meio de uma integral de contorno por meio de manipulações algébricas não muito complexas, obtendo-se a Equação (3.4), na qual $\vec{n}$ é o vetor unitário normal relativo às faces de cada volume de controle.

$$\frac{d\bar{T}_i}{dt} = \frac{2\pi}{V_i} \oint_{S_i} r \alpha \nabla T \cdot \vec{n} dS \tag{3.4}$$

A Equação 3.4 representa um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO) que pode ser expresso como apresentado na Equação (3.5), na qual $R(T, t) = 2\pi \oint_{S_i} r \alpha \nabla T \cdot \vec{n} dS$.

$$\frac{d\bar{T}_i}{dt} = \frac{1}{V_i} R(T, t) \tag{3.5}$$

A solução do sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO), representado pela Equação (3.5), requer a aplicação de uma metodologia de integração temporal eficiente. Métodos implícitos, embora apresentem um custo computacional mais elevado, garantem maior

estabilidade e robustez na solução de problemas transientes, tornando-se uma escolha adequada para aplicações em dinâmica dos fluidos computacional **(VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007)**.

Neste estudo, adotou-se o método de Euler implícito de primeira ordem, devido à sua simplicidade e eficiência na resolução de equações diferenciais ordinárias aplicadas a escoamentos e transferência de calor **(FERZIGER; PERIC; STREET, 2020)**. Sua aplicação à Equação (3.5) resulta na Equação (3.6)

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + \Delta t \frac{1}{V_i} R(T, t + \Delta t) \quad (3.6)$$

O parâmetro Δt representa o passo de tempo na integração numérica.

Para garantir precisão na integração temporal, o polinômio de reconstrução $T_{R'}^i$, empregado no cálculo do resíduo $R(T, t)$, deve ser avaliado no instante $t + \Delta t$. No entanto, sua determinação requer o conhecimento dos valores médios da propriedade T em cada volume de controle no mesmo instante **(MUNIZ; SECCHI; CARDOZO, 2008)**.

Diferente das formulações baseadas em diferenças finitas, nas quais a solução pode ser obtida resolvendo um sistema linear de equações algébricas, a abordagem k-exata gera um sistema de equações não lineares. Assim, a atualização da solução ao longo do tempo requer a aplicação do método de Newton N-dimensional para resolver esse sistema a cada passo temporal **(MICHALAK, 2009)**.

O método de Newton é utilizado para resolver sistemas da forma $F(T) = 0$, sendo que o componente i da função F pode ser definido pela Equação (3.7).

$$F_i = T_i(t + \Delta t) - T_i(t) + \Delta t \frac{1}{V_i} R(T, t + \Delta t) \quad (3.7)$$

A iteração de Newton para esse sistema é dada pela Equação (3.8),

$$J(T)\delta T = -F(T) \quad (3.8)$$

Na equação acima, $J(T)$ representa a matriz Jacobiana da função $F(T)$, e δT é a correção da solução. A atualização da solução ocorre conforme a Equação (3.9)

$$T^{n+1} = T^n + \delta T \quad (3.9)$$

A variável T^{n+1} é a solução após a atualização, e T^n corresponde à solução obtida na iteração anterior do método de Newton.

Cada iteração do método de Newton exige a resolução de um sistema linear de equações algébricas. Para essa finalidade, neste estudo, foi adotado o método GMRES (*Generalized Minimal Residual Method*), uma técnica eficiente para lidar com matrizes esparsas resultantes do processo de discretização numérica (MICHALAK, 2009).

A matriz Jacobiana foi calculada numericamente por meio do método de diferenças finitas, resultando na Equação (3.10)

$$J(T)_{ij} = \frac{F_i(T + \lambda_j \varepsilon) - F_i(T)}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

O termo ε representa um pequeno incremento, enquanto λ_j é um vetor cuja única componente não nula está na posição j e $\lambda_j = 1$.

A matriz Jacobiana obtida apresenta uma estrutura esparsa, pois apenas os elementos associados ao estêncil do volume de controle possuem valores não nulos. Essa característica possibilita a utilização de métodos numéricos avançados para a resolução do sistema linear, reduzindo significativamente o custo computacional e otimizando a eficiência da integração temporal implícita (FERZIGER; PERIC; STREET, 2020).

3.3.2. CÁLCULO DA LETALIDADE EM PROCESSOS DE ESTERILIZAÇÃO TÉRMICA APLICANDO A REGRA DOS TRAPÉZIOS

A letalidade acumulada (F_0) é um parâmetro essencial na avaliação da eficácia dos processos de esterilização térmica, sendo amplamente utilizada nas indústrias alimentícia para garantir a segurança microbiológica dos produtos processados. Esse parâmetro quantifica a destruição microbiana ao longo do tempo, considerando a relação entre a temperatura do meio e a resistência térmica dos microrganismos-alvo (BERTELI; BERTO; VITALI, 2013). O cálculo de F_0 baseia-se na relação entre temperatura e tempo, considerando a resistência térmica do microrganismo-alvo e a evolução térmica do produto ao longo do processo.

A taxa de destruição térmica de microrganismos pode ser descrita por um modelo exponencial. A letalidade instantânea em um dado tempo t é expressa matematicamente pela Equação (3.11).

$$L(t) = 10^{\frac{T(t)-T_0}{z}} \quad (3.11)$$

O termo $L(t)$ representa a letalidade instantânea no tempo t , enquanto $T(t)$ corresponde à temperatura do meio no tempo t em graus Celsius. A temperatura de referência T_0 é utilizada como base para a comparação do processo térmico e geralmente é adotada como 121,1°C. O coeficiente térmico de resistência microbiana z define a variação de temperatura necessária para modificar a taxa de destruição térmica em um fator de 10. Esse valor depende do microrganismo estudado e do meio em que ele está inserido, sendo frequentemente assumido como 10°C para *Clostridium botulinum* (STUMBO, 1973).

A letalidade acumulada ao longo do tempo é determinada pela integração da letalidade instantânea, conforme apresentado na equação (3.12)

$$F_0 = \int_{t_0}^{t_f} 10^{\frac{T(t)-T_0}{z}} dt \quad (3.12)$$

Essa integral não possui solução analítica exata para valores de $T(t)$ que variam de forma não linear ao longo do tempo. Dessa forma, para estimar F_0 , métodos numéricos de integração são aplicados. A Regra dos Trapézios é um dos métodos empregados para esse fim, pois permite aproximar a integral pela soma das áreas de pequenos trapézios formados entre pontos consecutivos do conjunto de dados térmicos (WILHELM; KLEINA, 2015). A aproximação numérica da letalidade acumulada é expressa pela Equação (3.13)

$$F_0 \approx \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t}{2} (L_i + L_{i-1}) \quad (3.13)$$

Os valores L_i e L_{i-1} correspondem às letalidades instantâneas nos instantes t_i e t_{i-1} , respectivamente. O termo Δt representa o intervalo de tempo entre as medições sucessivas (WILHELM; KLEINA, 2015).

A implementação desse cálculo foi realizada por meio de um programa em C++, considerando a evolução da temperatura ao longo do tempo e aplicando a Regra dos Trapézios para integrar numericamente a letalidade acumulada. A estratégia computacional adotada

envolve a leitura da temperatura medida ao longo do tempo e a aplicação da Equação (3.13) para somar iterativamente os valores obtidos em cada intervalo de tempo Δt . A cada nova leitura de temperatura, a letalidade instantânea é calculada e utilizada para atualizar a integral numérica.

A precisão no cálculo de F_0 é um fator determinante para a validação e otimização de processos industriais de esterilização térmica. A correta aplicação da Regra dos Trapézios e a integração de sistemas computacionais para a obtenção e análise de dados térmicos garantem maior confiabilidade ao controle de qualidade, permitindo uma melhor padronização dos processos e contribuindo para a segurança alimentar.

3.3.3. OBTENÇÃO DOS DADOS DE VALIDAÇÃO

O estudo utilizou dados experimentais de tempo e temperatura do patê de alcachofra, obtidos por **Gedraite (1999)**, em um ambiente experimental adequado para esse tipo de pesquisa. A escolha do patê de alcachofra como objeto de estudo deve-se à escassez de informações disponíveis na literatura científica sobre o produto, destacando a importância de compreender a dinâmica térmica envolvida no processo de esterilização.

Para a coleta dos dados, **Gedraite (1999)** monitorou as temperaturas do patê de alcachofra em uma lata com dimensões de 0,036 m de altura e 0,0137 m de diâmetro. O sensor de temperatura utilizado foi o *Data Trace*, posicionado no centro geométrico da lata, considerado o ponto mais frio do alimento durante o processo térmico. Essa escolha justificase pelo fato de essa região apresentar menor carga térmica e maior suscetibilidade ao crescimento microbológico.

As simulações foram realizadas em um computador com processador 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1255U, sistema operacional de 64 bits e 16 GB de RAM. Esses recursos computacionais foram essenciais para a execução eficiente dos cálculos, incluindo a resolução das equações diferenciais e a análise dos resultados, assegurando alta precisão e confiabilidade no modelo desenvolvido.

3.3.4. IMPLEMENTAÇÃO DA COMUNICAÇÃO CLIENTE-SERVIDOR VIA TCP/IP E EXPOSIÇÃO HTTP COM NGROK

Neste estudo, são utilizados dados coletados por **Gedraite (1999)**, que fundamentam a implementação de uma arquitetura cliente-servidor voltada para a aquisição, transmissão e processamento dessas informações. A comunicação entre os componentes do sistema é realizada por meio do protocolo TCP/IP, enquanto a disponibilização dos dados ocorre via um servidor HTTP, com exposição remota viabilizada pela ferramenta *ngrok*.

O sistema operacional utilizado para a implementação do sistema foi o Linux, escolhido devido à sua estabilidade e segurança, características essenciais para aplicações que exigem execução contínua e confiável. Além disso, sua flexibilidade e compatibilidade com ferramentas de rede, como *ngrok* e bibliotecas para comunicação via sockets, permitem uma integração eficiente com arquiteturas distribuídas baseadas no modelo cliente-servidor. Essa infraestrutura possibilita a comunicação eficiente entre os componentes do sistema **(TANENBAUM; WETHERALL, 2011)**.

A arquitetura cliente-servidor é amplamente utilizada em sistemas distribuídos, onde o cliente inicia a comunicação solicitando serviços ou enviando dados ao servidor, que processa as requisições e retorna as respostas apropriadas **(STALLINGS, 2020)**. No contexto deste trabalho, o cliente, desenvolvido em C++, atua como um módulo de aquisição de dados, enquanto o servidor, implementado em *Python*, é responsável pelo processamento e disponibilização das informações. Essa abordagem permitiu um fluxo de dados eficiente e seguro, garantindo a confiabilidade da transmissão e da visualização dos parâmetros monitorados.

A unidade responsável pela aquisição e transmissão de dados na arquitetura cliente-servidor implementada é denominada Cliente C++. Esse componente desempenha um papel fundamental na interface entre os dados e o servidor, garantindo que as informações sejam processadas e armazenadas.

- **Coleta de Dados:** Realiza a obtenção periódica dos valores de temperatura, conforme os dados coletados por **Gedraite (1999)**, e os encaminha ao servidor para processamento.
- **Transmissão de Dados:** Estabelece comunicação com o servidor por meio do protocolo TCP/IP, assegurando a integridade e a confiabilidade da transmissão das informações adquiridas.

A escolha da linguagem C++ para a implementação do cliente justifica-se por sua eficiência e controle sobre os recursos de *hardware*, características fundamentais para aplicações que demandam alto desempenho na aquisição e transmissão de dados em tempo real (SILBERSCHATZ; GALVIN; GAGNE, 2018).

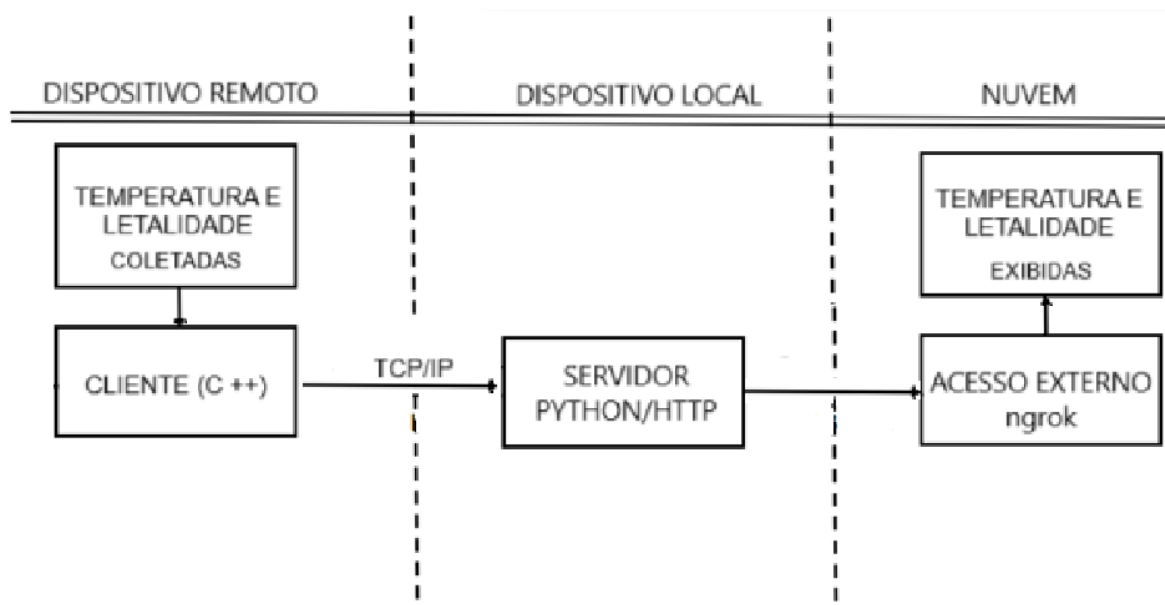
Para o processamento e exposição dos dados, foi desenvolvido um servidor em linguagem *Python*, responsável pela recepção, tratamento e disponibilização das informações transmitidas pelo Cliente C++. Sua implementação justifica-se pela necessidade de uma solução confiável e eficiente para o gerenciamento desses dados, assegurando a integridade no fluxo de informações. As principais funcionalidades do servidor incluem:

- **Processamento de Dados:** Recebe os valores de temperatura transmitidos pelo Cliente C++ via protocolo TCP/IP e calcula a letalidade com base nesses parâmetros, garantindo precisão na análise e confiabilidade nos resultados;
- **Disponibilização via HTTP:** Implementa um servidor HTTP para a exibição dos dados processados e dos gráficos gerados, permitindo o acesso remoto de forma estruturada e segura. Para viabilizar a comunicação externa, a ferramenta *ngrok* foi utilizada, possibilitando a exposição do servidor na rede;
- **Leitura e Plotagem de Dados:** Realiza a leitura dos valores de temperatura e letalidade recebidos do Cliente C++, executa os cálculos pertinentes e gera gráficos.

A escolha da linguagem *Python* fundamenta-se em sua sintaxe clara e objetiva, além da ampla disponibilidade de bibliotecas especializadas que facilitam o desenvolvimento ágil de aplicações voltadas ao processamento e exposição de dados. Essa abordagem garante a confiabilidade do sistema, promovendo uma interação entre seus componentes e permitindo uma visualização remota estruturada (O'REILLY, 2019).

A Figura 3.4 ilustra a arquitetura da comunicação cliente-servidor implementada neste estudo, permitindo a compreensão do fluxo de dados desde a coleta das informações até sua disponibilização em nuvem por meio do *ngrok*. A estrutura do sistema é organizada em três camadas, cada uma desempenhando um papel fundamental na transmissão, processamento e exposição dos dados

Figura 3.4 - Diagrama descritivo da comunicação cliente-servidor via protocolo TCP/IP



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.4 apresenta a estrutura organizada em três camadas. A primeira camada refere-se ao dispositivo remoto, onde está localizado o Cliente C++, responsável pela aquisição dos dados de temperatura conforme os parâmetros estabelecidos por **Gedraite (1999)**. Esses dados são transmitidos ao servidor utilizando o protocolo TCP/IP, garantindo integridade e confiabilidade na comunicação.

A caracterização como dispositivo remoto justifica-se pelo fato de que sua localização não está atrelada ao servidor local, podendo operar em ambientes distintos, desde que haja conectividade de rede para o envio contínuo dos dados. Conforme **Oliveira et al. (2005)**, tecnologias de acesso remoto permitem que usuários interajam com sistemas localizados em diferentes locais geográficos, mantendo a integridade e a confiabilidade da comunicação.

A segunda camada corresponde ao dispositivo local, onde opera o Servidor *Python/HTTP*, encarregado do processamento das informações recebidas. Esse servidor executa o cálculo da letalidade e gera representações gráficas a partir dos valores transmitidos pelo Cliente C++.

A terceira camada representa a nuvem, na qual ocorre a disponibilização remota do servidor por meio do *ngrok*, uma ferramenta que estabelece um túnel seguro para permitir o acesso externo aos dados processados. Essa abordagem possibilita que usuários e sistemas

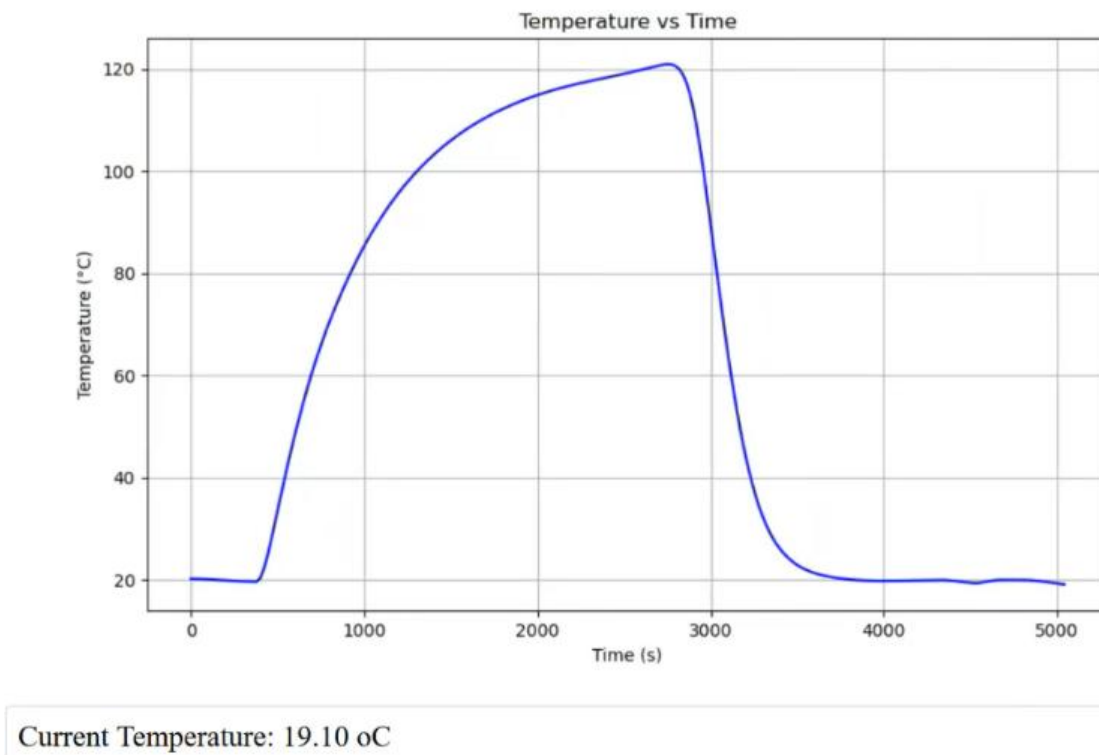
externos consultem as informações em tempo real, garantindo maior acessibilidade e flexibilidade na interação com o sistema.

A segmentação representada na Figura 3.4 organiza a coleta, o processamento e a exibição dos dados, tornando o sistema modular, escalável e eficiente, permitindo sua expansão e adaptação conforme novas demandas.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do experimento conduzido com o protótipo de autoclave proposto por **Gedraite (1999)**, foram obtidas curvas de temperatura e letalidade microbiana ao longo do tempo, permitindo uma análise detalhada da dinâmica térmica do sistema. A visualização dessas variáveis foi viabilizada por meio da plataforma desenvolvida, que possibilitou o acesso remoto aos dados em tempo real. A Figura 4.1 apresenta o final da simulação da temperatura.

Figura 4.1 - Simulação da temperatura em função do tempo ao final do processo



4.1. COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA

A curva de temperatura ao longo do tempo (Figura 4.1) evidencia as três fases características do processo térmico: aquecimento, manutenção da temperatura máxima e resfriamento. Inicialmente, observa-se um aumento progressivo da temperatura a partir do ambiente ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) até atingir o platô de esterilização, próximo a 121°C , por volta de 2700 segundos. Esse comportamento é coerente com estudos anteriores sobre a esterilização de alimentos enlatados, nos quais o aquecimento segue uma curva sigmoideal até atingir a temperatura-alvo (STUMBO, 1973).

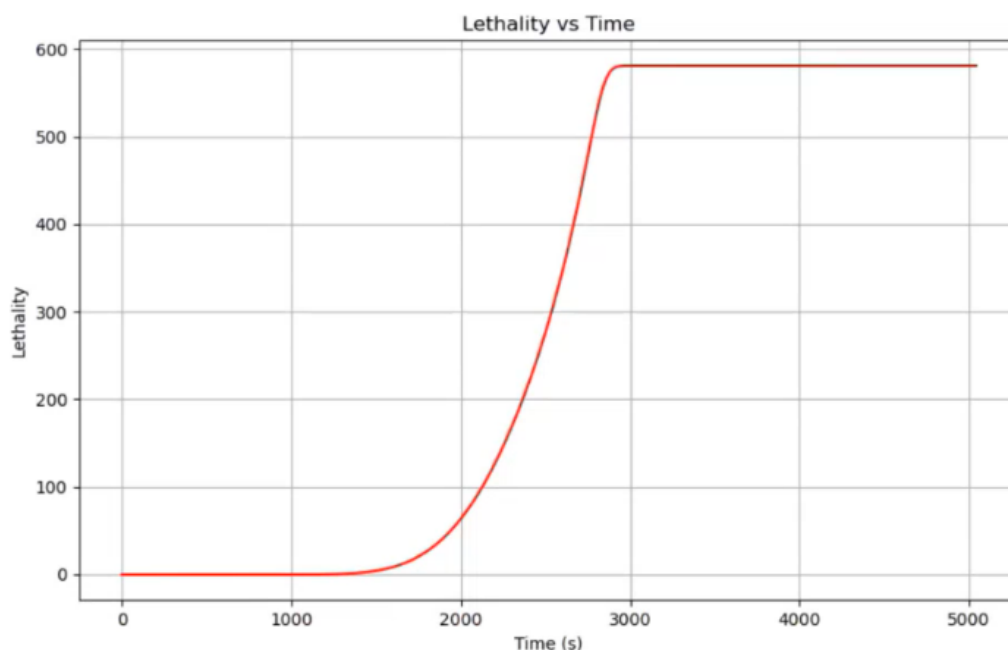
A fase de manutenção da temperatura ocorre entre 2500 e 2700 segundos, quando o patê de alcachofra permanece na faixa de letalidade térmica, garantindo a inativação do *Clostridium botulinum*. A fase final corresponde ao resfriamento, onde a temperatura do alimento decai rapidamente devido à remoção da fonte de calor e à dissipação térmica para o meio externo.

A precisão da simulação foi validada com os dados experimentais de Gedraite (1999), demonstrando que o modelo matemático empregado representa fielmente o comportamento térmico esperado para o sistema analisado.

4.2. AVALIAÇÃO DA LETALIDADE MICROBIOLÓGICA

A evolução da letalidade acumulada, ilustrada na Figura 4.2, reforça a eficácia do processo térmico na inativação microbiológica. Inicialmente, a letalidade permanece próxima de zero, pois a temperatura ainda não atingiu valores críticos para a destruição do *C. botulinum*. No entanto, a partir de 2000 segundos, observa-se um crescimento exponencial da letalidade, atingindo um valor próximo a 581,27140 unidades de letalidade (F_0) no final do processo.

Figura 4.2 - Simulação da letalidade em função do tempo ao final do processo



Current Lethality: 581.27140

A letalidade acumulada (F_0) constitui um parâmetro fundamental para a validação do processo de esterilização térmica, garantindo a inativação de microrganismos patogênicos e a estabilidade microbiológica de alimentos enlatados. De acordo com **Pflug (1996)**, um valor de $F_0 \geq 3$ minutos ou $F_0 \geq 180$ segundos é suficiente para assegurar a destruição de *Clostridium botulinum* em alimentos de baixa acidez, sendo amplamente adotado como referência na indústria alimentícia. No presente estudo, a letalidade acumulada atingiu $F_0 = 581,27140$ segundos, um valor substancialmente superior ao mínimo recomendado, evidenciando um processo térmico seguro.

A validação dos resultados computacionais frente aos dados experimentais evidencia a robustez do modelo adotado. A implementação do método de volumes finitos, associada à integração temporal por Euler implícito, permitiu uma estimativa precisa da evolução térmica do alimento.

4.3. APLICAÇÃO DA ARQUITETURA CLIENTE – SERVIDOR

A integração dos dados com a plataforma de monitoramento remoto possibilitou a visualização das variáveis em tempo real. A comunicação cliente-servidor via TCP/IP garantiu a transmissão das informações, enquanto a exposição do servidor HTTP com *ngrok* permitiu

acesso remoto. Esses recursos possibilitou o monitoramento contínuo e a otimização de processos térmicos em tempo real.

Os resultados confirmam que a implementação computacional proposta pode ser uma alternativa para otimização de processos térmicos, reduzindo custos operacionais e garantindo maior segurança microbiológica. A modularidade do sistema desenvolvido permite sua adaptação para diferentes produtos e condições de processamento, ampliando sua aplicabilidade na indústria de alimentos.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES, PROPOSTAS FUTURAS E CRONOGRAMA

Este capítulo tem por finalidade apresentar as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento do trabalho.

5.1 – CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo simular o comportamento térmico do patê de alcachofra acondicionado em embalagem metálica cilíndrica durante o processo de esterilização, validando os resultados obtidos por meio de modelagem matemática e integração computacional. A abordagem adotada permitiu a análise da dinâmica térmica do sistema, possibilitando a estimativa da temperatura no ponto mais interno do alimento e a avaliação da letalidade microbiológica ao longo do tempo.

Os resultados demonstraram que a metodologia empregada foi eficiente na predição do perfil térmico do produto, apresentando forte correlação com os dados experimentais de **Gedraite (1999)**. A modelagem matemática, baseada no método dos volumes finitos com reconstrução, mostrou-se adequada para a solução da equação diferencial que rege o fenômeno, garantindo precisão na representação da transferência de calor dentro da embalagem. Além disso, a utilização do método de Euler implícito para a integração temporal assegurou estabilidade numérica e eficiência computacional na simulação.

A avaliação da letalidade microbiológica confirmou a eficácia do processo de esterilização, uma vez que os valores de F_0 obtidos foram superiores ao limite mínimo necessário para a inativação do *Clostridium botulinum*, garantindo a segurança microbiológica

do alimento. A análise da curva de letalidade evidenciou que o processo térmico foi capaz de proporcionar uma redução expressiva da carga microbiana, reforçando a confiabilidade do modelo proposto.

Além da simulação computacional, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto para aquisição e visualização de dados em tempo real representa um avanço significativo na aplicação da tecnologia para o controle de processos térmicos. A implementação da arquitetura cliente-servidor via TCP/IP, associada à exposição dos dados por meio do *ngrok*, possibilitou o acesso remoto às informações do processamento térmico.

Dessa forma, o estudo realizado não apenas contribui para o avanço no entendimento do comportamento térmico de alimentos enlatados, como também propõe uma abordagem inovadora para o monitoramento e validação de processo de esterilização.

5.2 – PROPOSTAS FUTURAS

Como perspectiva futura, sugere-se a ampliação do modelo para diferentes tipos de alimentos enlatados. A aplicação de sensores térmicos e o aprimoramento das estratégias de comunicação em tempo real podem potencializar ainda mais a precisão e a confiabilidade do monitoramento remoto.

Portanto, o presente estudo reforça a importância da ciência de dados aplicada à engenharia de alimentos, evidenciando que a utilização de modelagem matemática, simulação computacional e monitoramento remoto pode revolucionar o controle de processos térmicos, promovendo maior segurança e eficiência.

5.3 – TRABALHOS PUBLICADOS

Durante o desenvolvimento do projeto de pesquisa foram publicados os seguintes trabalhos:

GONTIJO, D. L. M.; LEAL, L.; BARBOSA, R. Y. M.; SANTANA, A. A.; GEDRAITE, R. Determinação da difusividade térmica da proteína texturizada de soja. In: TECALI 2023 – SIMPÓSIO ONLINE SUL-AMERICANO DE TECNOLOGIA, ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, 2023, Online. Anais... Online: Even3, 22-26 maio 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/tecali2023/>. Acesso em: [data de acesso].

GONTIJO, D. L. M.; LEAL, L.; SISLIAN, R.; GEDRAITE, R. Estimação da difusividade térmica do patê de coração de alcachofra. In: XXVI ENMC – ENCONTRO NACIONAL DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 2023, Nova Friburgo. Anais... Nova Friburgo: Even3,

25-27 out. 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxvi-encontro-nacional-de-modelagem-computacional-xiv-encontro-de-ciencia-e-tecnologia-dos-materiais-338941/>. Acesso em: [data de acesso].

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). Nota sobre Indústria 4.0. 2017. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/artigo-nota-sobre-industria-4-0/>. Acesso em: 26 set. 2024.

AGROSAFETY. Indústria 4.0 e o impacto tecnológico na produção de alimentos. 2022. Disponível em: <https://agrosafety.com.br/blog/detalhes/industria-40-e-o-impacto-tecnologico-na-producao-de-alimentos>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ASP. A Evolução dos Sistemas de Indicador Biológico. 2020. Disponível em: <https://www.asp.com/pt-br/educacao/evolucao-dos-sistemas-de-indicador-biologico>. Acesso em: 16 fev. 2025.

BARBOSA, Rafael Yuri Medeiros. Determinação de parâmetros ótimos no processo de deságue em peneiras vibratórias. 2021. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34062/1/Determina%c3%a7%c3%a3oPar%c3%a2metros%c3%93timos.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.676>.

BERTELI, M. N.; BERTO, M. I.; VITALI, A. 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, v. 16, n. 3, p. 243-252, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/pqsRMLV3NDpfBf94CFk3zgL/>. Acesso em: 14 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000030>.

BERTO, M. I.; VITALI, A. A. Controle em tempo real em um processo de esterilização convencional. Brazilian Journal of Food Technology, v. 11, n. 4, p. 252-262, out./dez. 2008. Disponível em: <https://bjft.ital.sp.gov.br/arquivos/artigos/v11n40808a.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2025.

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

BOEHLER, L.; DANIOL, M.; SROKA, R.; OSINSKI, D.; KELLER, A. Sensors in the autoclave - modelling and implementation of the IoT steam sterilization procedure counter. Sensors, v. 21, n. 2, p. 510, 2021.

BOTSARIS, A. S.; ALVES, A. M. Caracterização química e potencial biotecnológico do extrato de alcachofra. 2013. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4949>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CARVALHO, Joelia Marques de; ARAÚJO, Lidiane Oliveira de. Inovação na indústria de alimentos e sua interface com o setor regulador no Brasil. Cadernos de Prospecção, v. 10, n. 3, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/23062>. Acesso em: 10 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.9771/cp.v10i3.23062>.

CHEN, Z.; HUAN, G.; MA, Y. Computational methods for multiphase flows in porous media. Philadelphia: SIAM, 2006.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M.; STREET, R. D. Computational methods for fluid dynamics. 4. ed. Cham: Springer, 2020.

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

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

GEPEA. Indústria 4.0: como ela impacta no setor de alimentos? 2021. Disponível em: <https://gepea.com.br/industria-4-0/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

GERMANO, P. M. L.; GERMANO, M. I. S. Higiene e vigilância sanitária de alimentos. 3. ed. Barueri: Manole, 2011.

GILL, A. Q.; HEVARY, S. Cloud monitoring data challenges: a systematic review. Sydney: University of Technology, 2022.

GONTIJO, D. L. M. Estimação da difusividade térmica em produto aquecido por condução baseado em problema inverso. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.5066>.

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

GRIGORIOU, N. N.; FINK, A. Cloud computing: key to enabling smart production and industry 4.0. In: MADSEN, O. et al. (eds.). The future of smart production for SMEs. Springer, 2022. p. 315–322.

HOSHYARI, S.; OLLIVIER-GOOCH, C. F. A higher-order unstructured finite volume solver for three-dimensional compressible flows. 2018. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-1306>. Acesso em: 15 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-1306>.

IDUGEL. O futuro da automação na indústria de processamento de alimentos. 2023. Disponível em: <https://idugel.com.br/automacao-na-industria-de-processamento-de-alimentos/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ISMAIL, I. M.; FAHMY, A.; AZAB, A.; ABADIR, M.; FATEEN, S.-E. Optimizing the sterilization process of canned food using temperature distribution studies. IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science, v. 6, n. 4, p. 26-33, nov./dez. 2013.

ITAL – Instituto de Tecnologia de Alimentos. Microbiologia de alimentos. Campinas: ITAL, 2001.

KUMAR, R.; BANYAL, R. K.; KUMAR, V.; HOODA, D. Cloud computing: technological innovations in the food industry. In: MOR, R. S.; KAMBLE, S. S.; SANGWAN, K. S. (eds.). Operations and supply chain management in the food industry. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Springer, 2022. p. 127-141.

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.

LIAO, Y.; CHEN, P.; XU, X.; ZHONG, R. Y.; HUANG, G. Q.; YU, Y. Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. International Journal of Production Research, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.

MICHALAK, C. Efficient high-order accurate unstructured finite-volume algorithms for viscous and inviscid compressible flows. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – University of British Columbia, 2009. Disponível em: <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0067108>. Acesso em: 15 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.14288/1.0067108>.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Botulismo. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/b/botulismo>. Acesso em: 10 fev. 2025.

MIRANDA-ZAMORA, W.; TIRADO-KULIEVA, A.; RICSE, D. Aplicações computacionais para a avaliação e simulação do tratamento térmico de alimentos conservas. IntechOpen, 2022.

MOOSAVI, J.; BAKHSHI, J.; MARTEK, I. A aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 na gestão de pandemias: revisão da literatura e estudo de caso. Healthcare Analytics, 2021.

MUNIZ, A. R.; SECCHI, A. R.; CARDOZO, N. S. M. High-order finite volume method for solving viscoelastic fluid flows. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 25, p. 153–166, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjce/a/CBGXcYGsQpGcgymBGcmdpnx/?lang=en>. Acesso em: 15 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000100016>.

NASCIMENTO, R. S. Monitoramento do processo de autoclavação de alimentos enlatados. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/18512>. Acesso em: 3 out. 2024.

NGROK. HTTP Endpoints. ngrok Documentation, 2023. Disponível em: <https://ngrok.com/docs/http/>. Acesso em: 16 fev. 2025.

OLIVEIRA, A. B.; KALLAS, C. H.; HYPPOLITO, M. G.; CURI, R. B. Acesso remoto a computadores. In: CONGRESSO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO, 2005. Anais... Disponível em: <https://www.cesarkallas.net/arquivos/faculdade/topicos2/acesso-remoto.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2025.

O'REILLY, M. Programming Python. 4. ed. O'Reilly Media, 2019.

PECH, M.; VRCHOTA, J.; BEDNÁŘ, J. Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory: review. Sensors, v. 21, n. 4, p. 1470, 2021.

PFLUG, I. J. Discussion of the Z-value to use in calculating the F0-value for high-temperature sterilization processes. PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology, Bethesda, v. 50, n. 1, p. 51-54, 1996. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8846059/>. Acesso em: 16 fev. 2025.

RODRIGUES, A. V. Alcachofra: da origem à transformação em bem cultural e turístico no município de São Roque. 2017. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/039eb7b3-cb12-48c5-9e5c-afbd1a085848/2017_AdrianaVillarRodrigues.pdf. Acesso em: 10 fev. 2025.

RODRIGUES, G. C.; GALDINO, L. R.; ANTUNES NETO, J. M. F. Aplicação da computação em nuvem em pequenas e médias empresas: revisão sistemática. Prospectus: Gestão e Tecnologia, Itapira, v. 1, n. 1, p. 87-116, fev. 2019.

RÜBMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALSH, M.; KRMER, R.; STAUDER, H. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group, v. 9, 2015.

SANTANA, A. A. Identificação de parâmetros em problemas de advecção-difusão combinando a técnica do operador adjunto e métodos de volumes finitos de alta ordem. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

SHUKUR, H.; ZEEBAREE, S.; ZEBARI, R.; ZEEBAREE, D.; AHMED, O.; SALIH, A. Cloud computing virtualization of resources allocation for distributed systems. Journal of Applied Science and Technology Trends, [S.l.], v. 1, n. 3, p. 98-105, 27 jun. 2020.

SILBERSCHATZ, A.; GALVIN, P. B.; GAGNE, G. Operating system concepts. 10. ed. Wiley, 2018.

SOLOMON, H. M.; LILLY, T. Jr. Clostridium botulinum. In: BACTERIOLOGICAL ANALYTICAL MANUAL. 8. ed. Silver Spring: U.S. Food and Drug Administration, 2001. Disponível em: <https://www.fda.gov/media/183343/download>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SOUSA, F. R. C.; MOREIRA, L. O.; MACHADO, J. C. Computação em nuvem: conceitos, tecnologias, aplicações e desafios. In: MOURA, R. S.; SOUZA, F. V.; OLIVEIRA, A. C. (org.). III Escola Regional de Computação Ceará, Maranhão e Piauí. Piauí: SBC, 2009. Cap. 7, p. 150-175.

SOUZA, C. S. Caracterização química das folhas de alcachofra (*Cynara scolymus* L.) cultivada no Brasil. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal

do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/80428/000901762.pdf?isAllowed=y&sequence=1>. Acesso em: 10 fev. 2025.

STALLINGS, W. Computer networking with Internet protocols and technology. 7. ed. Pearson, 2020.

STEPHANOPOULOS, G. Chemical process control. New Jersey: Prentice Hall, 1984.

STUMBO, C. R. Thermobacteriology in food processing. 2. ed. New York: Academic Press, 1973. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/236891037_Review_on_CR_STUMBO_1973_Thermobacteriology_in_Food_Processing_2nd_ed. Acesso em: 10 fev. 2025.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. Computer networks. 5. ed. Pearson, 2011.

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

TOLEDO, R. T. Fundamentals of food process engineering. 2. ed. London: Chapman & Hall, 1994.

VAHIDPOUR, F.; GUTHMANN, E.; ARREOLA, J.; GHAZALI, Y.; WAGNER, T.; SCHÖNING, M. J. Avaliação de vários parâmetros de processo para condições de esterilização otimizadas usando uma plataforma multissensorial. Foods, v. 11, n. 5, p. 660, 2022.

VAN ALTENA, M. High-order finite-volume discretisations for solving a modified advection-diffusion problem on unstructured triangular meshes. Dissertação (Mestrado) — University of British Columbia, 1999.

VERAS, M. Computação em nuvem: nova arquitetura de TI. Rio de Janeiro: Brasport, 2015.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

VILLALOBOS, K.; RAMÍREZ-DURÁN, V.; DIEZ, B.; BLANCO, J. Uma arquitetura hierárquica de três níveis para um armazenamento eficiente de dados da Indústria 4.0. Computing in Industry, 2020.

VINCENT, P. E.; JAMESON, A. Facilitating the adoption of unstructured high-order methods amongst a wider community of fluid dynamicists. Mathematical Modelling of Natural Phenomena, EDP Sciences, v. 6, n. 3, p. 97–140, 2011.

VON NEUMANN, J. The role of mathematics in the sciences and in society. In: COLLECTED WORKS, v. 6. Oxford: Pergamon Press, 1956. p. 208.

WILHELM, V. E.; KLEINA, M. Integração numérica: regra dos trapézios. Universidade Federal do Paraná, 2015. Disponível em:

https://docs.ufpr.br/~volmir/MN_15_integracao_regra_trapezio_ppt.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.