

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE TÉRMICA DE UMA AUTOCLAVE INDUSTRIAL

AUTOR: CARLOS EDUARDO MACHADO

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ LEÔNCIO FONSECA DE SOUZA

Belo Horizonte

2026

CARLOS EDUARDO MACHADO

**ANÁLISE TÉRMICA DE UMA AUTOCLAVE
INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr José Leôncio Fonseca de
Souza

Belo Horizonte

2026

M149a Machado, Carlos Eduardo
Análise térmica e eficiência energética de uma autoclave industrial / Carlos Eduardo Machado. – 2026.
39 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: José Leôncio Fonseca de Souza.

Banca examinadora: José Leôncio Fonseca de Souza, Frederico Romagnoli Silveira Lima e Paulo Eduardo Lopes Barbieri.

Bibliografia: f. 38-39.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Autoclave – Equipamentos – Teses. 2. Calor – Transmissão – Teses. 3. Método dos elementos finitos – Teses. 4. Isolamento térmico – Teses. 5. Eficiência energética – Teses. I. Souza, José Leôncio Fonseca. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 621.042

CARLOS EDUARDO MACHADO

ANÁLISE TÉRMICA DE UMA AUTOCLAVE HORIZONTAL

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 18/06/2026



José Leôncio Fonseca de Souza, Doutor, Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Frederico Romagnoli Silveira Lima, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Paulo Eduardo Lopes Barbieri, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me conceder a oportunidade de concluir o curso na instituição que sempre sonhei. Sem o Senhor Deus, nada disso seria possível, desde todas amizades ao desenvolvimento, tanto como profissional, quanto como ser humano.

Além disso, gostaria de agradecer a todos os meus familiares que me apoiaram nesse trajeto e que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos. São alguns anos fisicamente longe da família, mas extremamente conectados em pensamentos e orações.

Não poderia deixar de agradecer o Professor Dr. José Leôncio que me orientou neste trabalho, sua dedicação, paixão pelo ensino e atenção constante foram fundamentais para o amadurecimento e desenvolvimento de todo o projeto.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta o desenvolvimento e a validação de um modelo térmico numérico tridimensional por Elementos Finitos (MEF) no software *COMSOL Multiphysics 5.0*, com o objetivo de analisar a distribuição energética de uma autoclave industrial Getinge modelo 6710 no seu platô de esterilização. A pesquisa foca em mapear os mecanismos de transferência de calor para o ambiente e avaliar o desempenho do sistema original de isolamento composto (lã de vidro e lã de rocha). A metodologia envolveu a simplificação geométrica do equipamento, a aplicação de condições de contorno de convecção natural e radiação, e a execução de testes de convergência de malha, sendo validada qualitativamente por medições, demonstrando excelente concordância e confirmando a robustez do modelo. O estudo identificou as regiões críticas de maior dissipação térmica devido à exposição de área superficial e comprovou a eficácia das camadas isolantes em reter o calor, permitindo concluir que o isolamento composto foi adequadamente dimensionado para o processo sob a ótica da conservação de energia.

Palavras Chaves: Autoclave Industrial, Transferência de Calor, Método dos Elementos Finitos, Isolantes térmicos, Eficiência Energética.

ABSTRACT

This Final Course Work presents the development and validation of a three-dimensional numerical thermal model using the Finite Element Method (FEM) in *COMSOL Multiphysics 5.0* software, with the objective of analyzing the energy distribution of a Getinge model 6710 industrial autoclave during its sterilization plateau. The research focuses on mapping the heat transfer mechanisms to the environment and evaluating the performance of the original composite insulation system (glass wool and rock wool). The methodology involved the geometric simplification of the equipment, the application of natural convection and radiation boundary conditions, and the execution of mesh convergence tests, being qualitatively validated through field measurements using infrared thermography, demonstrating excellent agreement and confirming the robustness of the model. The study identified the critical regions of greatest thermal dissipation due to surface area exposure and proved the effectiveness of the insulating layers in retaining heat, allowing the conclusion that the composite insulation was adequately dimensioned for the process from the perspective of energy conservation.

Key-words: Industrial Autoclave, Heat Transfer, Finite Element Method, Thermal Insulation, Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de esterilização	16
Figura 2 – Transdutor de pressão	18
Figura 3 – Pressostato Danfoss	19
Figura 4 – Configuração antes da medição	22
Figura 5 – Configuração pós medição	22
 Figura 6 – Representação esquemática da autoclave	 25
Figura 7 – Modelo completo da câmara de esterilização	34
Figura 8 – Camada interior da câmara	35
Figura 9 – Isolamento primário	36
Figura 10 – Detalhe da malha entre a câmara e o isolamento primário.	37
Figura 11 – Ponto (P)	38
Figura 12 – Aplicação da malha <i>Mais Fina</i> - equipamento completo	39
Figura 13 – Aplicação da malha <i>Mais Fina</i> - câmara	40
Figura 14 – Superfícies com incidência de radiação	41
Figura 15 – Convecção natural - Lateral Externa da câmara	42
Figura 16 – Convecção natural - Base Externa da câmara	42
Figura 17 – Convecção natural - Topo Externo da câmara	43
 Figura 18 – Medição central	 46
Figura 19 – Medição inferior - 10 cm da base	46
Figura 20 – Medição superior - 10 cm do topo	46
Figura 21 – Referência para medição	47
Figura 22 – Distribuição de temperatura na parede lateral - medições realizadas	47
Figura 23 – Distribuição da temperatura externa	49
Figura 24 – Corte longitudinal	51
Figura 25 – Corte latitudinal	51
Figura 26 – Linha de referência para figura 27	52
Figura 27 – T x E (Lateral e Porta)	53
Figura 28 – Linha de referência para Figuras 29 e 30	53
Figura 29 – T x E (região inferior)	54
Figura 30 – T x E (Região superior)	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Água líquido-vapor saturados	20
Tabela 2 – Dimensões e posições dos domínios modelados	37
Tabela 3 – Estudo de convergência de malha	38
Tabela 4 – Emissividade do material utilizado	41
Tabela 5 – Condições de temperatura utilizadas no modelo	43
Tabela 6 – Função da condutividade térmica dos materiais utilizados no modelo	44
Tabela 7 – Temperaturas medidas nas regiões analisadas	46
Tabela 8 – Comparação entre temperaturas medidas e calculadas	48
Tabela 9 – Temperaturas das superfícies externas da autoclave	50
Tabela 10 – Temperatura a 0,08 m da parede interna da autoclave	55
Tabela 11 – Influência da radiação térmica na lateral externa direita da autoclave . . .	55
Tabela 12 – Energia dissipada por superfície	56
Tabela 13 – Propriedades termodinâmicas do vapor na câmara	56
Tabela 14 – Parâmetros utilizados na estimativa da eficiência energética	57
Tabela 15 – Resumo das etapas de cálculo do balanço energético e eficiência	57

LISTA DE SIMBOLOS

α	Difusividade térmica (m^2 / s)
β	Coefficiente de expansão volumétrica térmica ($1 / \text{K}$)
ΔT	Diferença de temperatura ou gradiente térmico (K ou $^{\circ}\text{C}$)
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor ou potência térmica (W ou J/s)
$\dot{Q}_{\text{convecção}}$	Taxa de transferência de calor por convecção (W)
$\dot{Q}_{\text{radiação}}$	Taxa de transferência de calor por radiação (W)
$\dot{Q}_{\text{total}}$	Perda térmica total global da autoclave (W)
ϵ	Emissividade térmica da superfície (adimensional)
η	Eficiência energética simplificada do aquecimento (adimensional)
Γ	Coefficiente de difusão generalizado nas equações do MEF
$\mathbf{u}$	Vetor velocidade do escoamento do fluido (m/s)
$\nabla \cdot$	Operador divergência
∇	Operador gradiente vetorial
ν	Viscosidade cinemática do ar fluido (m^2 / s)
ϕ	Variável escalar genérica de transporte nas equações de conservação
ρ	Densidade ou massa específica (kg / m^3)
$\rho_{\text{aço}}$	Massa específica do aço estrutural da carcaça (kg / m^3)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($\approx 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
A	Área da superfície de troca térmica (m^2)
A_{inf}	Área superficial inferior (m^2)
A_{lat}	Área superficial lateral (m^2)
A_{portas}	Área superficial das portas (m^2)
A_{sup}	Área superficial superior (m^2)
c_p	Calor específico sob pressão constante ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)

$c_{p,\text{aço}}$	Calor específico do aço estrutural (J/(kg·K))
D	Diâmetro ou dimensão característica (m)
E	Espessura da camada de material ou isolamento (m)
E_{arm}	Energia interna armazenada no sistema (J ou kJ)
E_{ent}	Energia que entra no sistema de controle (J ou kJ)
E_{sai}	Energia que sai do sistema de controle (J ou kJ)
g	Aceleração da gravidade ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)
Gr	Número de Grashof (adimensional)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção (W/(m ² ·K))
h_c	Coefficiente de convecção natural médio (W/(m ² ·K))
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação (W/(m ² ·K))
k	Condutividade térmica do material (W/(m·K))
k_{isol}	Condutividade térmica do material isolante (W/(m·K))
L	Comprimento ou altura característica da superfície (m)
m	Massa total do componente metálico (kg)
Nu	Número de Nusselt (adimensional)
Nu_L	Número de Nusselt médio baseado no comprimento característico L
P	Pressão manométrica ou absoluta (Pa ou bar)
P_{sat}	Pressão de saturação do vapor (bar)
Pr	Número de Prandtl (adimensional)
Q	Quantidade de calor ou energia térmica (J ou kJ)
$Q_{\text{armazenada}}$	Energia armazenada na estrutura metálica (J ou kJ)
Q_{entrada}	Energia total fornecida ao sistema (kJ)
Q_{perdida}	Energia térmica dissipada para o ambiente (J ou kJ)
Ra	Número de Rayleigh (adimensional)

Ra_L	Número de Rayleigh baseado no comprimento característico L
Re	Número de Reynolds (adimensional)
T	Temperatura (K ou °C)
t	Tempo de duração ou intervalo transiente (s)
T_s	Temperatura da superfície externa exposta (K ou °C)
T_f	Temperatura de filme do fluido ($T_f = (T_s + T_{amb})/2$) (K ou °C)
T_{int}	Temperatura da parede interna da câmara (K ou °C)
T_{max}	Temperatura máxima registrada (°C)
T_{med}	Temperatura média registrada (°C)
T_{sat}	Temperatura de saturação do vapor (°C)
T_{viz}	Temperatura da vizinhança / laboratório (K ou °C)
V	Volume geométrico ou do componente (m ³)
x, y, z	Coordenadas cartesianas espaciais (m)
Erro (%)	Erro percentual relativo entre simulação e termografia
MEF	Método dos Elementos Finitos

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Princípio de funcionamento de uma Autoclave Industrial	15
3.1.1 Componentes para controle de ciclos	16
3.2. Aspectos Termodinâmicos do Processo de Esterilização	19
3.2.1 Vapor saturado	19
3.2.2 Gases não condensáveis (GNC)	20
3.2.3 Qualidade da água de formação do vapor	22
4. METODOLOGIA.....	24
4.1. Problema físico	24
4.2. Modelo matemático	24
4.2.1 Considerações físicas	25
4.2.2 Equações.....	26
4.3. Procedimento numérico	32
4.4. Detalhamento geométrico.....	33
4.4.1 Descrição da geometria	33
4.4.2 Simplificações geométricas	34
4.4.3 Descrições dimensionais	36
4.5. Desenvolvimento da malha	37
4.6. Condições de contorno e propriedades	40
4.6.1 Fenômenos térmicos	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1. Validações do modelo	45
5.2. Comportamento térmico	48
5.2.1 Temperaturas médias	48
5.2.2 Planos	50
5.3. Parcela de contribuição da Radiação	55
5.4. Fluxo térmicos nas superfícies	55
5.5. Estimativa da eficiência energética da autoclave durante o aquecimento	56
6. CONCLUSÃO	58
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59

REFERÊNCIAS	60
-------------------	----

1. INTRODUÇÃO

A esterilização por vapor saturado sob pressão é um dos processos mais utilizados em ambientes industriais, hospitalares e laboratoriais que exigem elevados níveis de assepsia e controle microbiológico. Nesse contexto, as autoclaves industriais desempenham papel fundamental, operando em condições de temperatura e pressão elevadas para promover a eliminação de microrganismos por meio da transferência de calor do vapor saturado para os materiais processados. Durante o ciclo de esterilização, especialmente no platô térmico, o equipamento é submetido a intensos gradientes de temperatura, tornando o comportamento térmico das paredes e dos materiais isolantes um fator determinante para o desempenho operacional e para a segurança do sistema.

A adequada dissipação de calor em autoclaves industriais está diretamente relacionada ao projeto térmico da câmara de esterilização e à eficiência dos materiais isolantes empregados em sua construção. Um isolamento térmico inadequado pode favorecer perdas excessivas de calor, formação de condensado indesejado, elevação da temperatura superficial externa e instabilidades térmicas ao longo do processo. Dessa forma, a análise dos mecanismos de transferência de calor presentes no equipamento — condução, convecção e radiação — torna-se essencial para compreender o comportamento térmico da autoclave e validar numericamente a configuração construtiva adotada.

O princípio de funcionamento de autoclave industrial consiste na utilização de vapor de água saturado e pressurizado. Costumeiramente, são utilizados geradores de vapor elétricos para conversão de água líquida em vapor saturado, visto que convertem praticamente toda a energia elétrica em calor, alcançando eficiência energética superior às caldeiras convencionais, com vapor seco e controle instantâneo de temperatura, (AGUIAR, 2000), sem a necessidade de vasos de pressão robustos.

Nesse processo, a alta energia contida no vapor pressurizado promove a desnaturação das proteínas dos microrganismos por meio da hidrólise, resultando em um efeito esterilizante em curto intervalo de tempo. A eficácia da esterilização em autoclaves varia conforme os parâmetros de temperatura, pressão, tempo de aplicação e níveis de umidade, (SAHIN, 2022).

Os valores usuais de pressão são da ordem de 3 bar a 3,5 bar e os modelos são construídos para operarem à temperatura de 121°C a 134°C, dependendo da aplicação, (MEDSOLUT, 2025). Tendo a vantagem de ser relativamente simples e poder ser utilizada para esterilizar diversos tipos de materiais hospitalares e produtos laboratoriais.

As fases que compõem um ciclo de autoclave são:

- Pré-vácuo: Consiste em uma etapa de geração de vácuo com a retirada de todo o ar presente no interior do equipamento com a finalidade de facilitar o contato entre o vapor saturado e a carga.
- Admissão de vapor: entrada de vapor saturado máquina criando ambiente favorável para

o contato como material a ser esterilizado.

- Esterilização: Período em que há a manutenção da temperatura e pressão no interior do equipamento por um determinado período. O tempo de exposição varia conforme o material a ser autoclavado.
- Equalização: Liberação do vapor de água após o fim da esterilização.
- Arrefecimento: Resfriamento da carga até uma temperatura que permita a retirada dos materiais da autoclave.

Equipamentos como as autoclaves, que operam em condições de temperatura e pressão elevadas, durante ciclos prolongados, destacam-se pelo elevado consumo de energia e de recursos ambientais, como apresentado acima.

A compreensão detalhada do comportamento térmico desses sistemas, por meio da realização do balanço térmico, possibilita identificar as principais fontes de perdas de energia e avaliar a eficiência global do processo. Essas informações serão extremamente úteis para a proposição de melhorias no sistema, otimizando o processo como um todo, desde materiais utilizados na fabricação, dimensão ideal de acordo com o processo, melhorias dos componentes de suporte como o gerador de vapor e sistema de exaustão, e sem deixar de lado as demandas de segurança operacional.

A escolha da autoclave como objeto de estudo justifica-se pela sua ampla aplicação em setores estratégicos da indústria, como o farmacêutico, hospitalar e alimentício. Apesar da sua consolidação no processo e crescente demanda, esses equipamentos ainda são defasados e operam com baixos níveis de eficiência energética.

Academicamente, este trabalho oferece uma oportunidade para a aplicação prática de conceitos fundamentais da engenharia mecânica, como a termodinâmica e a transferência de calor. A análise térmica de uma autoclave também favorece o desenvolvimento de competências técnicas essenciais, incluindo a modernização de instrumentos de medição, modelagem matemática de sistemas térmicos e avaliação de indicadores de desempenho energético.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo térmico numérico de uma autoclave industrial utilizando o Método dos Elementos Finitos para avaliar a dissipação de calor pelo isolamento durante o platô de esterilização.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o levantamento das características operacionais da autoclave industrial, incluindo temperaturas, tempos de ciclo e propriedades dos materiais utilizados.
- Modelar a transferência de calor em regime permanente nas paredes de uma autoclave industrial utilizando o *COMSOL Multiphysics 5.0*.
- Realizar o balanço térmico da câmara.
- Estimar a eficiência energética em regime estacionário da autoclave.

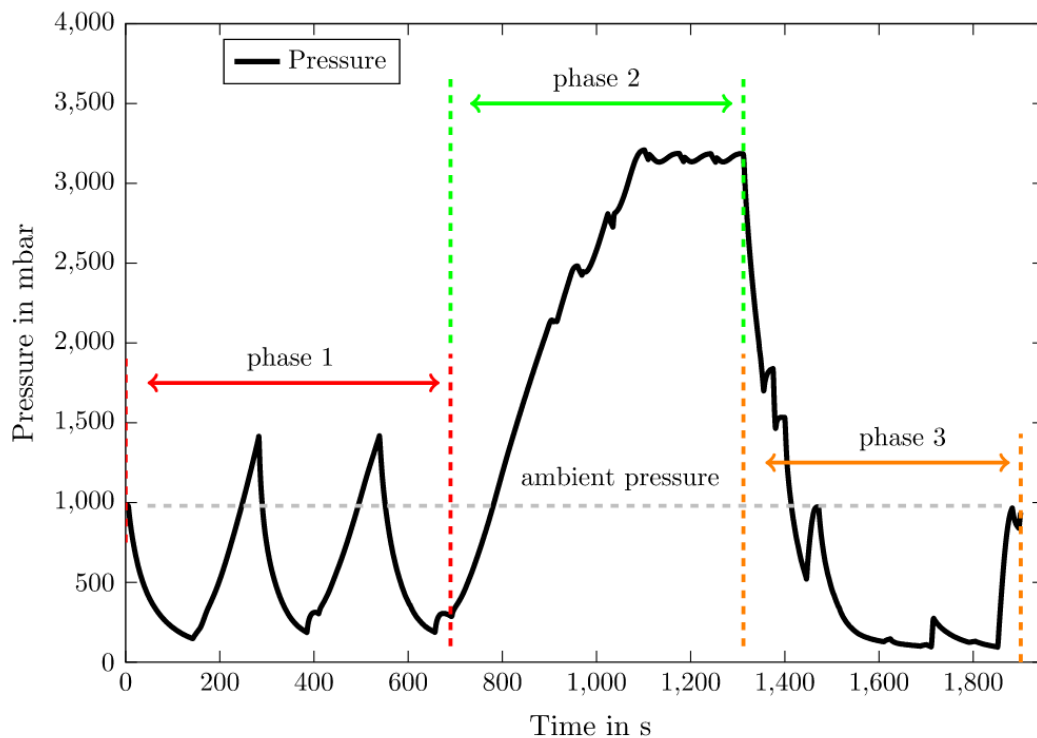
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Autoclaves industriais desempenham um papel central em processos de esterilização por vapor saturado sob pressão, especialmente em ambientes industriais que exigem altos padrões de assepsia, como laboratórios de biotecnologia, indústrias farmacêuticas e alimentícias.

3.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA AUTOCLAVE INDUSTRIAL

Este tipo de equipamento utiliza o método de esterilização por meio do vapor saturado. Este tipo de método é mais eficaz que a esterilização pelo método de calor seco, visto que a capacidade térmica do vapor é maior que a do ar seco visto que possui maior energia cumulada. A energia térmica libertada pelo vapor é aproximadamente 500 vezes maior que a do ar seco por cada grau Celsius de arrefecimento. Deste modo, quando o vapor saturado atinge o material a ser esterilizado que está mais frio, a quantidade de calor liberada pelo vapor será 500 vezes maior que a liberada pela mesma quantidade de ar seco. Por consequência, o objeto é aquecido muito mais rapidamente pelo vapor. Para além disso, quando se emprega vapor sob pressão, há fornecimento constante de vapor muito quente ao objeto a ser aquecido,(LACHMAN, 2001).

Para o sucesso de um ciclo de esterilização por vapor saturado em uma autoclave, algumas etapas do ciclo são de extrema importância e devem ser seguidas. Na primeira fase (fase de pré-vácuo), todos os gases não condensáveis (GNCs) devem ser removidos do equipamento. Na segunda fase, a pressão e a temperatura aumentam até um nível predefinido (Admissão de vapor). Em seguida, a pressão e a temperatura permanecem constantes por um período de tempo especificado (platô de esterilização). Na terceira fase do ciclo de esterilização, a pressão diminui até níveis de aproximadamente 100 mbar (pressão absoluta). Nessa fase, ocorre a secagem e o resfriamento da carga. Após isso, a pressão no esterilizador é ajustada para as condições ambientais, garantindo que o esterilizador possa ser aberto com segurança, (FEURHUBER, 2018). Na figura 1 pode-se observar o comportamento da pressão em relação ao tempo de um ciclo de esterilização.

Figura 1 – Ciclo de esterilização

Fonte: (FEURHUBER, 2017)

3.1.1. Componentes Para Controle De Ciclos

As autoclaves industriais são equipamentos totalmente automatizados e sua estrutura vai da câmara de esterilização a pequenos atuadores de pressão, e ambos são fundamentais para o seu devido processo e funcionamento.

Os ciclos são controlados por medidores de pressão, tempo e temperatura. Muitos modelos desse tipo de equipamentos são encontrados como parte de uma autoclave industrial, porém, a maioria possui o método de funcionamento bem estruturado e semelhante, como será abordado para cada componente abaixo.

- **Sensores de temperatura:** Conforme norma (BRITISH STANDARD, 2015) os sensores de temperatura devem ter precisão adequada para garantir a medição fiável da temperatura durante o processo de esterilização, além de serem calibrados rotineiramente.

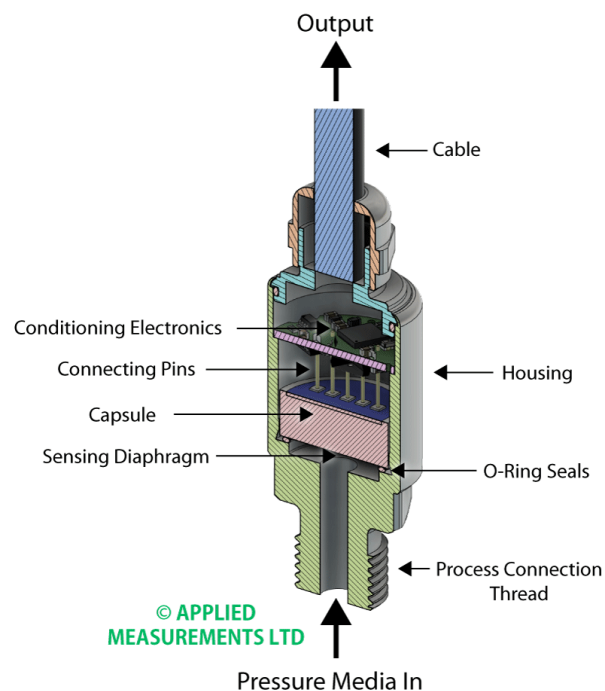
Os tipos mais comuns de sensores de temperatura incluem termistores, termopares, sensores de temperatura por resistência (RTDs), circuitos integrados de termômetros digitais e circuitos integrados de termômetros analógicos. Porém, para atenderem às normas regulatórias, o mais comum é utilizar RTDs, os quais utilizam uma resistência elétrica que altera o seu valor conforme há variação de temperatura. O exemplo mais comum de RTD

são os sensores de temperatura Pt100, que têm sido usados durante muitos anos para medir a temperatura em processos laboratoriais e industriais.

A maioria dos medidores de temperatura RTD é composta por um fio fino enrolado em espiral à volta de um núcleo de cerâmica ou vidro. Também existem versões do sensor sob a forma de platina depositada (*sputtering*) sobre um substrato cerâmico. O sensor é geralmente frágil, sendo frequentemente colocado dentro de uma bainha de proteção (LESZEK PIECHOWSKI; ADAM MUC; JAN IWASZKIEWICZ, 2021).

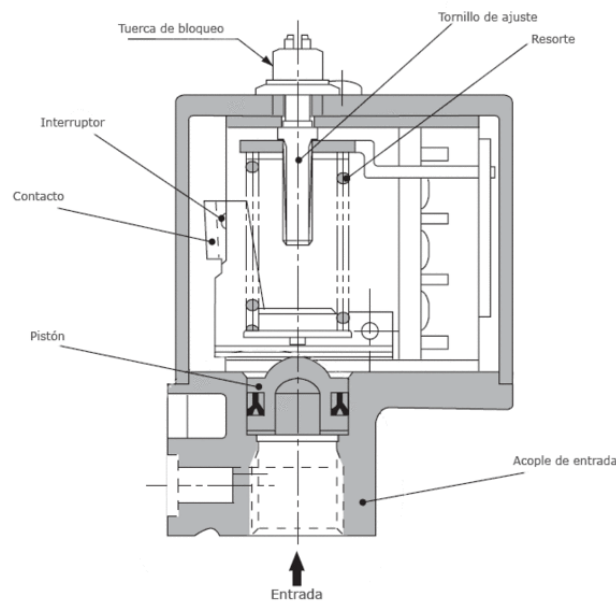
- **Transdutores de pressão:** Os medidores de pressão são dispositivos fundamentais na conversão de pressão física em sinais elétricos mensuráveis, facilitando o uso e automatizando processos eletricamente controlados. Segundo (JENA; GUPTA, 2021), os avanços recentes na tecnologia de sensores transformaram significativamente esses dispositivos, especialmente com a incorporação da tecnologia MEMS (sistemas microeletromecânicos), que permitiu a miniaturização e o aumento da precisão dos sensores.

Tradicionalmente, os transdutores de pressão operam com base em diferentes princípios físicos, como piezoresistência, capacitância, indutância, piezoelectricidade ou ressonância. Entre esses, os sensores piezoresistivos são amplamente utilizados devido à sua sensibilidade, facilidade de fabricação e integração com circuitos eletrônicos. Eles consistem em uma membrana sensível à pressão, acoplada a elementos resistivos cuja variação de resistência reflete as alterações de pressão, conforme é apresentado na figura 2.

Figura 2 – Transdutor de pressão

Fonte: APPLIED MEASUREMENTS

- **Itens de segurança - Válvulas de segurança, pressostato, termostatos:** Os equipamentos térmicos e de pressão exigem dispositivos de segurança rigorosos para garantir a proteção de pessoas, equipamentos e do ambiente. Entre os principais itens de segurança destacam-se as válvulas de segurança, os pressostatos e os termostatos.
 - **Válvula de segurança:** As válvulas de segurança são dispositivos automáticos projetados para liberar pressão excessiva de um sistema fechado, evitando explosões ou danos por sobrepressão. Elas são calibradas para abrir quando a pressão ultrapassa um limite seguro pré-estabelecido, e fecham automaticamente quando a pressão retorna ao nível normal. Em autoclaves são utilizadas para sobrecarga de pressão no gerador de vapor, na câmara e na jaqueta de aquecimento.
 - **Pressostato:** O pressostato é um sensor eletromecânico que monitora a pressão de um sistema e atua comutando um circuito elétrico quando a pressão atinge um valor predeterminado. Conforme imagem 3, assim que a pressão atinge o *Set Point* setado, o circuito é fechado e um sinal elétrico é enviado ao sistema e o qual atua conforme configurado. Em autoclaves, além de ser utilizado no sistema de abertura e fechamento da porta hermética, também é utilizado como um sistema de segurança primário, previamente conectado à válvula de segurança.

Figura 3 – Pressostato Danfoss

Fonte: DANFOSS

- **Termostato:** O termostato é um dispositivo que regula a temperatura de um sistema, ativando ou desativando equipamentos de aquecimento ou refrigeração conforme a temperatura medida atinge limites definidos. É um item de segurança essencial em sistemas que operam com temperaturas controladas como o gerador de vapor do equipamento.

3.2. ASPECTOS TERMODINÂMICOS DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO

O processo de esterilização a vapor é fundamentado nos princípios clássicos da termodinâmica, na física do vapor saturado e no processo microbiológico de esterilização.

Vapor é água em estado gasoso; portanto, não é tóxico, geralmente está disponível e é relativamente fácil de controlar. Um bom entendimento dos princípios e ciclos básicos do vapor é necessário para evitar erros que podem levar a itens de carga não estéreis, baixo desempenho do equipamento, lesões pessoais, menor produtividade, maiores custos de operação e manutenção, e danos aos itens de carga, (MARCEL DION; WAYNE PARKER, 2013).

3.2.1. Vapor Saturado

Para que o processo de esterilização ocorra sem falhas, é imprescindível o contato direto do vapor com todas as superfícies dos objetos a serem esterilizados. Na ausência desse contato

completo, a esterilização torna-se insuficiente, comprometendo a eficácia do processo e não assegurando a esterilidade do material. Ressalta-se que o vapor saturado possui uma quantidade de energia térmica armazenada significativamente superior à do ar seco ou do vapor saturado, - conforme apresentado na tabela 1 - o que o torna especialmente eficaz como agente esterilizante.

Tabela 1 – Água líquido-vapor saturados

Temperatura (°C)	Volume específico (m ³ /kg)		Entalpia (kJ/kg)	
	v_l	v_v	h_l	h_v
100	0,001043	1,6720	419,17	2675,60
120	0,001060	0,89133	503,81	2706,00
135	0,001075	0,58179	567,75	2726,90

Fonte: Adaptado de (YUNUS A. ÇENGEL; MICHAEL A. BOLES, 2013).

Como apresentado na tabela 1, se comparado ao líquido saturado, o vapor saturado acumula, por kg de água, cerca de 5 vezes mais energia. Isso é chave para o processo de esterilização, visto que parte dessa energia é transferida ao material por meio da condensação do vapor ao entrar em contato com o objeto a ser esterilizado, o qual está mais frio. Porém, quando o vapor saturado condensa, seu volume diminui significativamente — 1 litro de vapor saturado transforma-se em aproximadamente 1,1 mL de condensado. Mas, sempre que ocorre condensação, a redução de volume provoca uma queda de pressão local, o que atrai mais vapor para essas zonas até que o item atinja a temperatura do vapor e sem que haja a necessidade de aquecimento adicional - inserção de mais vapor, (ARNAN BEN-DAVID, 2023).

Sendo assim, a transferência de calor entre os objetos só ocorre quando há diferença de temperatura. Uma vez que os itens na autoclave atingem a temperatura do vapor, a transferência de energia cessa, assim como a condensação — estabelece-se o equilíbrio térmico. Pequenas quantidades adicionais de vapor penetram na câmara apenas para compensar perdas de calor nas portas e paredes da câmara (mesmo que o manto esteja aquecido, sua temperatura é inferior à da câmara)

3.2.2. Gases Não Condensáveis (GNC)

Os gases não condensados (GNCs), como o ar atmosférico (principalmente oxigênio e nitrogênio), estão entre os principais obstáculos à eficácia da esterilização por vapor saturado. A presença desses gases na câmara da autoclave interfere diretamente no processo de transferência de calor por condensação, que é essencial para que os materiais sejam esterilizados. Como já pontuado, a transferência de calor por vapor saturado ocorre de forma eficiente quando o vapor condensa diretamente na superfície dos itens. Porém, a presença de GNCs forma uma camada gasosa entre o vapor e o objeto, impedindo a condensação e, conseqüentemente, a esterilização local.

As condições de esterilização a vapor implicam que 100% de vapor d'água deve estar presente sob uma determinada temperatura por um determinado tempo. Para estabelecer essas condições, o ar inicialmente presente na câmara da autoclave deve ser substituído por vapor saturado. Se pequenas quantidades (cerca de 1% ou mais) de gases não condensáveis, como o ar, estiverem presentes na câmara de esterilização no início da fase de esterilização, as condições de esterilização a vapor ainda poderão ser atendidas nas superfícies da carga expostas diretamente ao vapor, mas a penetração do vapor em, por exemplo, materiais porosos ou canais estreitos poderá ser seriamente prejudicada, (J. P. C. M. VAN DOORNMALEN, 2013). Uma possível falta de penetração do vapor já foi reconhecida há meio século e levou ao desenvolvimento do teste de penetração de vapor Bowie e Dick (B&D), (J. BOWIE; J. KELSEY; G. THOMPSON, 1963).

Conforme normas Internacionais, a quantidade de Gases Não-Condensáveis deve ser inferior a 3,5% do volume do vapor comparado com o condensado e o cálculo dessa concentração é feito por meio da equação 3.1:

$$\varphi_{\text{Norm}} = \frac{V_b}{V_c} \quad (3.1)$$

V_b : Volume coletado de GNC (ml)

V_c : Volume coletado de condensado ml

Ainda de acordo com as normas, a relação GNC é medida no início do período de esterilização na qual a pressão e a temperatura permanecem em um nível predefinido por um período de tempo especificado, conforme configuração do ciclo selecionado.

A configuração experimental utilizada para medir a razão de gases não condensáveis, está ilustrada nas Figuras 4 e 5. A Figura 4 apresenta o sistema antes do início da medição, enquanto a Figura 5 mostra a configuração final, após as medições terem sido concluídas.

Antes de iniciar o procedimento, todos os GNC são removidos do sistema de medição para garantir a precisão dos resultados. No ponto de início da medição, as saídas do esterilizador a vapor são abertas, permitindo que o fluido interno — composto por vapor, condensado e GNC — flua através de um condensador (Figura 4).

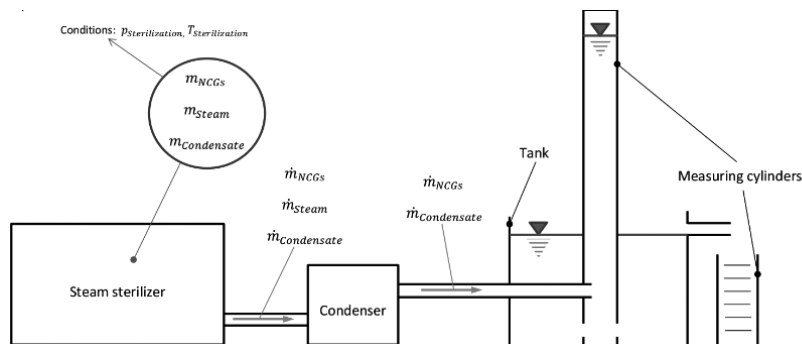
A medição é finalizada quando a pressão interna do esterilizador a vapor atinge as condições ambientais.

Nos pontos de medição, o interior do esterilizador contém uma mistura de vapor saturado, condensado e GNC. Após atravessar o condensador, a água condensada (vapor condensado + líquido condensado) é coletada separadamente da fração gasosa. Os GNC fluem do condensador para um cilindro medidor previamente preenchido com um volume conhecido de água. Esse cilindro está imerso em um tanque também cheio de água, conectado por uma cavidade comum.

À medida que o nível da água no tanque se eleva, o excesso transborda para um segundo cilindro medidor (Figura 5). Simultaneamente, a mistura de água e GNC proveniente do condensador entra no primeiro cilindro. Devido à diferença de densidade entre os GNC e a água,

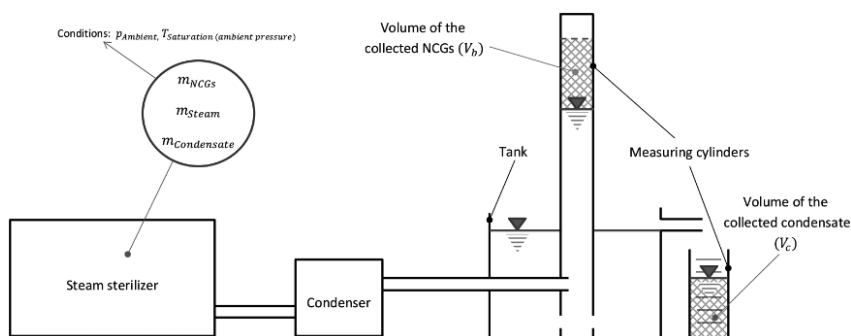
os gases sobem dentro do cilindro, deslocando o nível da água para baixo e provocando o transbordamento do líquido para o segundo recipiente, (FEURHUBER, 2018).

Figura 4 – Configuração antes da medição



Fonte: (FEURHUBER, 2018)

Figura 5 – Configuração pós medição



Fonte: (FEURHUBER, 2018)

3.2.3. Qualidade Da Água De Formação Do Vapor

A presença de gases não condensáveis (GNCs) durante o processo de esterilização a vapor representa um dos maiores riscos à eficácia do ciclo, comprometendo a validação do processo e a qualidade do produto final. Estes gases, como oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono, não se liquefazem com o vapor saturado, dificultando a transferência de calor e a penetração do vapor nos materiais a serem esterilizados.

O estudo de (EMERSON APARECIDO MIGUEL, 2022) avaliou a influência da qualidade da água usada na geração de vapor sobre a concentração de GNCs. Foram analisados 170 testes entre 2016 e 2021, com uso de diferentes tipos de água: água amolecida, osmose reversa simples, água purificada (PW) e água para injetáveis (WFI). Os resultados indicaram que sistemas

que utilizaram WFI apresentaram os melhores índices de conformidade (92,4% de aprovação), enquanto a água purificada teve a maior taxa de falhas (64,7%).

Segundo a norma EN 285:2015, a concentração máxima de GNCs permitida é de 3,5 mL por 100 mL de condensado. O estudo conclui que o uso de WFI, devido à sua pureza e baixo conteúdo de gases dissolvidos, é o mais adequado para geração de vapor em processos de esterilização, apesar de seu custo elevado. Portanto, a escolha do tipo de água tem impacto direto na eficácia do processo, sendo um fator crítico em autoclaves industriais.

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho descreve as etapas teóricas e numéricas utilizadas para a análise térmica e cálculo da dissipação de calor. O estudo foi conduzido com base em princípios da termodinâmica e da transferência de calor e, para aperfeiçoar a análise condições de contorno teóricas e reais, são apresentadas nos tópicos seguintes.

O procedimento metodológico tem como objetivo representar o comportamento térmico da autoclave durante a fase de esterilização, permitindo avaliar as perdas energéticas por convecção e radiação afim de avaliar a dissipação térmica pelas paredes do equipamento. Para isso, foi desenvolvido um modelo físico e matemático fundamentado no balanço de energia em regime permanente.

4.1. PROBLEMA FÍSICO

A autoclave industrial é um equipamento térmico que opera sob condições de temperatura e pressão elevadas, promovendo a esterilização de materiais por meio de vapor saturado. O processo ocorre em uma câmara metálica envolta por camadas de isolamento térmico, cujo objetivo é minimizar as perdas de calor para o ambiente.

O modelo desenvolvido usará como referência uma autoclave industrial *Getinge* modelo 6710.

O equipamento possui 4 camadas principais, sendo elas a espessura da câmara de esterilização, câmara da jaqueta, isolamento primário e isolamento secundário.

- Câmara principal: recebe o vapor sob pressão e temperatura elevadas para eliminar microrganismos.
- Câmara da jaqueta(camisa de vapor): É um invólucro que é preenchido com vapor(separado da câmara) e o seu intuito é manter a camada interna uniforme evitando a condensação do vapor saturado dentro da câmara devido ao choque entre a parede fria e o vapor em alta temperatura durante o aquecimento.
- Isolamento primário : reduz a perda de calor proveniente da jaqueta. Neste modelo, há uma intercalação longitudinal entre material isolante e materiais estruturais da câmara.
- Isolamento secundário: garante a segurança térmica (evita que a superfície externa aqueça demasiadamente) e proteção mecânica das camadas internas.

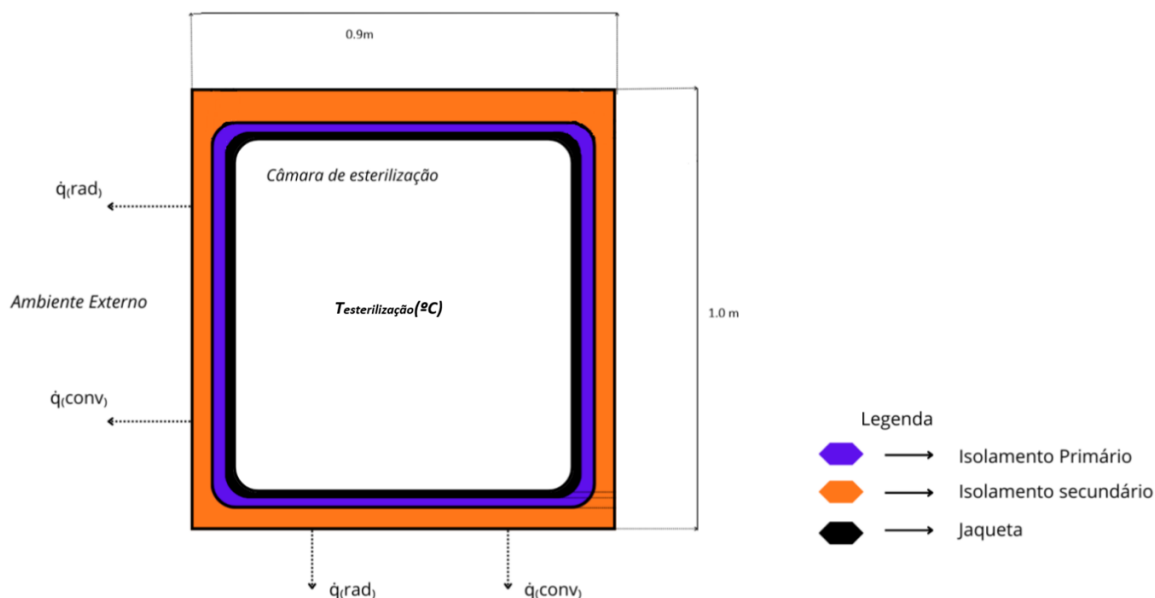
4.2. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto descreve os mecanismos de transferência de calor predominantes durante o platô de esterilização — condução, convecção natural e radiação térmica.

Como o processo opera em regime quase-estacionário e com propriedades termo físicas pouco variáveis, são adotadas formulações simplificadas, mantendo-se a precisão necessária para estimativa das perdas térmicas.

Para analisar adequadamente cada etapa do projeto, as seções seguintes serão organizadas de acordo com os diferentes mecanismos de transferência de calor presentes no equipamento: condução, convecção e radiação. A Figura 6 apresenta uma representação esquemática dos fluxos de calor por convecção e radiação para o ambiente, bem como a disposição das camadas de isolamento térmico. Na ilustração, a região correspondente à jaqueta está destacada em preto, o isolamento primário em roxo e o isolamento secundário em laranja.

Figura 6 – Representação esquemática da autoclave



Fonte: Próprio autor

Porém, a análise térmica da autoclave durante o platô de esterilização exige a definição clara das considerações físicas adotadas para representar adequadamente o comportamento do sistema. Como o processo ocorre sob condições controladas e com mínima variação temporal das grandezas termodinâmicas, algumas simplificações podem ser assumidas sem perda significativa de precisão.

4.2.1. Considerações Físicas

O modelo desenvolvido considerou-se que a câmara da autoclave opera em regime estacionário durante a fase de esterilização, uma vez que a temperatura e a pressão internas se mantêm constantes durante o processo.

Além disso, assumiu-se que o interior da câmara é preenchido por vapor saturado sem a presença de Gases Não-Condensáveis e com propriedades termo-físicas constantes durante o intervalo analisado. Como o vapor apresenta alta difusividade térmica e capacidade de acumular energia, foi considerado que a temperatura no fluido é praticamente uniforme no interior da câmara, assumindo a temperatura do vapor como a temperatura da parede.

A câmara da jaqueta em autoclaves horizontais é projetada com a finalidade de aquecer as paredes metálicas externas da câmara de esterilização, contribuindo para a manutenção da temperatura e evitando a condensação do vapor saturado. Em condições operacionais usuais, a temperatura da jaqueta é mantida ligeiramente inferior ao *setpoint* de esterilização.

No modelo, com o objetivo de simplificar a simulação, a câmara da jaqueta não foi explicitamente considerada. Em seu lugar, foi adotada uma camada contínua de isolamento primário envolvendo integralmente a câmara interna, desconsiderando as descontinuidades associadas à presença da jaqueta. Essa simplificação não compromete a representatividade do modelo, uma vez que a análise é conduzida em regime estacionário, durante o platô de esterilização, no qual os gradientes térmicos se encontram devidamente estabilizados.

As paredes da câmara são classificadas conforme sua orientação espacial, pois a convecção natural depende diretamente da ação da gravidade. Assim, as quatro superfícies laterais são tratadas como placas verticais, enquanto as superfícies superior e inferior são abordadas como placas horizontais, cada uma com correlações específicas dos números de *Nusselt*, *Rayleigh* e *Prandtl*.

A radiação térmica é modelada considerando uma superfície difusa-cinza trocando calor com um ambiente amplo e isotrópico. Os efeitos de fator de forma entre superfícies internas ou entre isolantes são desprezados devido à predominância do mecanismo convectivo. Adicionalmente, assumem-se as seguintes hipóteses:

1. Regime estacionário;
2. Sem geração de calor própria.
3. Propriedades dos materiais constantes
4. Condutividade térmica dos materiais variam com a temperatura.
5. Área da vizinhança muito maior que a área da autoclave.
6. Modelo de convecção cujo coeficiente convectivo é obtido de correlações empíricas adimensionais do número de *Nusselt*.

4.2.2. Equações

Os fenômenos citados acima (condução, convecção e radiação) se basearão nas seguintes equações apresentadas abaixo.

4.2.2.1. Equação De Difusão De Calor - Condução

De maneira geral e completa, a condução pode ser expressa conforme a equação da difusão de calor abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_G = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

Em que:

ρ : densidade do material (kg/m³)

c_p : calor específico (J/kg·K)

T : temperatura (K)

t : tempo (s)

k : condutividade térmica (W/m·K)

$\dot{q}$: geração volumétrica de calor (W/m³)

A equação geral da difusão de calor é apresentada conforme equação 4.1.

Conforme consideração 1, o termo temporal da equação 4.1 é igualado a zero:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

Assim, a equação 4.1 é simplificada para:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_G = 0 \quad (4.3)$$

Conforme consideração 2, não há geração de calor próprio no sistema, o que implica em:

$$\dot{q}_G = 0 \quad (4.4)$$

Essa simplificação, aplica-se na equação 4.3 da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.5)$$

Já, de acordo com a consideração 3, como as propriedades dos materiais são constante, a equação 4.3 simplifica-se da seguinte maneira:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (4.6)$$

4.2.2.2. Condição De Contorno De Convecção - Ambiente Externo

Durante o processo de esterilização, embora o ar ambiente externo à autoclave permaneça globalmente em repouso, desenvolvem-se correntes de convecção natural ao redor das superfícies externas do equipamento devido às diferenças de temperatura entre as paredes metálicas da

autoclave e o ambiente. Esse movimento é induzido pelo empuxo térmico gerado pela variação de densidade do ar aquecido próximo às superfícies.

Pela lei de resfriamento de Newton a transferência de calor por convecção é dada por meio da equação 4.7:

$$q''_{\text{conv}} = h(T_s - T_{\infty}) \quad (4.7)$$

Em que:

q''_{conv} : taxa de transferência de calor (W/m^2)

h : coeficiente convectivo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

T_s : temperatura da superfície (K)

T_{∞} : temperatura do fluido ambiente (K)

O termo h depende da geometria e da convecção natural, e por isso será estimado via *Nusselt* por meio das correlações empíricas.

Além disso, o comportamento da transferência de calor por convecção varia conforme a orientação geométrica das paredes externas — verticais, superiores ou inferiores — em razão da influência da gravidade sobre a convecção natural. Como o fluxo é predominantemente laminar, utilizam-se correlações empíricas consolidadas para placas verticais e horizontais, conforme recomendado por (INCROPERA et al., 2014) e que também são utilizadas pelo *COMSOL Multiphysics*.

- Placa vertical:

Uma placa vertical, resfriada em relação a um fluido ambiente, há o alinhamento do vetor gravitacional com a força de empuxo e essa, atuará exclusivamente para induzir movimento do fluido no sentido ascendente.

- Placa horizontal:

Em uma placa horizontal, a força de empuxo é normal à superfície da placa, ou seja, vertical (perpendicular à placa). Com uma redução na força de empuxo paralela à superfície, há uma redução nas velocidades do fluido ao longo da placa, e pode-se esperar a ocorrência simultânea de uma redução na transferência de calor por convecção.

Placas verticais - Tanto as portas da máquina e as outras duas laterais são consideradas placas verticais, as quais, a transferência de calor por convecção em função da distância da placa pode ser expressada conforme equação 4.7.

Porém, é necessário calcular o coeficiente convectivo o qual, para situação de placa vertical, pode ser calculado da seguinte pela equação 4.8:

$$h = \frac{\overline{Nu} \cdot k}{L} \quad (4.8)$$

Em que:

$\overline{Nu}$: número de Nusselt médio

k : condutividade térmica do fluido (W/m·K)

L : comprimento característico (m)

O número de *Nusselt* pode ser estimado por meio da seguinte equação 4.9:

$$\overline{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4.9)$$

Em que:

Ra_L : número de Rayleigh

Pr : número de Prandtl

Para estimar o número de *Nusselt*, é necessário calcular o número de *Rayleigh* e também de *Prandtl*, conforme equações 4.10 e 4.11 abaixo:

$$Ra_{x,c} = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) x^3}{\nu \alpha} \quad (4.10)$$

Em que:

g : aceleração da gravidade (m/s²)

β : coeficiente de expansão térmica (1/K)

x : distância característica (m)

ν : viscosidade cinemática (m²/s)

α : difusividade térmica (m²/s)

Pr : número de Prandtl

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.11)$$

Placas horizontais- Para a base da máquina e o topo , a transferência de calor pode ser expressada também pela lei de resfriamento de Newton, conforme equação 4.7.

O coeficiente convectivo também será calculado por meio de *Nusselt*, *Rayleigh* e *Prandtl*, porém, o número de *Nusselt* por meio das correlações apresentadas abaixo conforme valores do número de *Rayleigh* e *Prandtl* :

$$\overline{Nu} = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7, Pr \geq 0.7) \quad (4.12)$$

$$\overline{Nu} = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}, \text{ todos } Pr) \quad (4.13)$$

$$\overline{Nu} = 0.52 Ra_L^{1/5} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^9, Pr \geq 0.7) \quad (4.14)$$

Para o número de *Rayleigh*, o calculo se manterá conforme equação 4.10.

4.2.2.3. Condição De Contorno De Radiação - Ambiente Externo

Entre a câmara, os isolamentos e o ambiente externo onde a autoclave está instalada, ocorre transferência de calor por convecção entre a superfície externa do equipamento e o ar ambiente, conforme discutido no tópico 4.2.2. Esse mecanismo resulta do movimento das massas de ar em contato com as paredes externas da autoclave, que promovem a remoção de calor devido à diferença de temperatura entre a superfície e o meio externo.

Entretanto, a convecção não é o único mecanismo de troca térmica presente. Também ocorre transferência de calor por radiação térmica, em que, toda superfície com temperatura acima do zero absoluto (0 K) emite energia radiante, e a intensidade dessa emissão é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, conforme a Lei de *Stefan-Boltzmann* apresentada na equação 4.15:

$$q_{\text{rad}}'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (4.15)$$

Em que:

q_{rad}'' : taxa de calor por radiação (W/m^2)

ε : emissividade da superfície

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T_{viz} : temperatura da vizinhança ou ambiente (K)

Considera-se radiação entre uma superfície difusa-cinza e o ambiente, desprezando efeitos de fator de forma.

Assim, a superfície externa da autoclave emite radiação térmica para o ambiente.

A troca líquida de calor por radiação pode ser expressa de maneira simplificada pela equação 4.15.

Dessa forma, o balanço térmico externo da autoclave resulta da combinação dos efeitos de convecção e radiação, ambos relevantes para determinar a taxa total de dissipação de calor para o meio ambiente.

4.2.2.4. Balanço Térmico Da Autoclave

Durante o aquecimento inicial do equipamento, o vapor saturado introduzido na câmara fornece energia térmica para elevação da temperatura das paredes metálicas, dos materiais isolantes e do volume interno da autoclave, até que seja atingida a condição operacional de esterilização.

Nessa etapa, diferentemente do regime permanente, ocorre armazenamento de energia no sistema, caracterizando um regime transiente de aquecimento. Assim, parte da energia fornecida pelo vapor permanece armazenada no equipamento, enquanto outra parcela é dissipada

para o ambiente externo através das superfícies da autoclave por condução, convecção natural e radiação térmica.

Dessa forma, o balanço energético simplificado do processo de aquecimento pode ser descrito pela equação 4.16 abaixo:

$$Q_{entrada} = Q_{armazenada} + Q_{perdida} \quad (4.16)$$

As perdas térmicas para o ambiente foram estimadas a partir da potência térmica dissipada obtida nas simulações em regime estacionário. Assumindo-se, de forma simplificada, que a taxa de dissipação térmica média durante o aquecimento da autoclave permanece aproximadamente constante ao longo do intervalo de aquecimento.

Assim, a energia dissipada foi determinada pela equação 4.17:

$$Q_{perdida} = \dot{Q}_{dissipada} \cdot t \quad (4.17)$$

A energia armazenada no sistema foi estimada considerando predominantemente o aquecimento da massa da parede metálica da autoclave, admitindo-se que a maior parcela da capacidade térmica do sistema encontra-se concentrada nas paredes metálicas do equipamento.

Embora os materiais isolantes também sofram elevação de temperatura durante o aquecimento da autoclave, sua contribuição para o armazenamento energético total foi desconsiderada nesta estimativa simplificada devido à sua baixa densidade quando comparadas à estrutura metálica da autoclave.

Dessa forma, considerou-se que a principal parcela de energia armazenada no sistema está associada ao aquecimento do corpo metálico do equipamento, sendo esta uma aproximação adequada para a análise energética simplificada proposta neste trabalho.

Para essa estimativa, utilizou-se a equação 4.18 clássica de aquecimento sensível:

$$Q_{armazenada} = m c_p \Delta T \quad (4.18)$$

Em que:

- $Q_{armazenada}$: energia térmica armazenada no sistema (J)
- m : massa da estrutura metálica da autoclave (kg)
- c_p : calor específico do material a pressão constante $\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$
- ΔT : variação de temperatura entre a condição inicial e final (K)

A eficiência energética simplificada do aquecimento da autoclave foi então estimada a partir da razão entre a energia efetivamente armazenada no sistema e a energia total fornecida durante o processo de aquecimento, conforme equação 4.19:

$$\eta = \frac{Q_{armazenada}}{Q_{entrada}} \quad (4.19)$$

4.3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

As equações diferenciais ordinárias e parciais que descrevem fenômenos físicos complexos geralmente não possuem solução analítica exata, especialmente em geometrias irregulares ou condições de contorno não triviais. Por esse motivo, torna-se necessário empregar métodos numéricos capazes de obter soluções aproximadas.

Entre esses métodos, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), amplamente utilizado na engenharia para resolver problemas de transferência de calor, escoamento de fluidos e análise estrutural. O princípio fundamental do MEF consiste em dividir o domínio de interesse em subdomínios menores, denominados elementos finitos, conectados por nós. O conjunto desses elementos forma a malha numérica, enquanto as funções matemáticas que aproximam o comportamento das variáveis dentro de cada elemento são chamadas de funções de forma ou funções de interpolação.

A formulação do problema inicia-se pela definição das equações governantes do sistema. Conforme apresentado por (MALALASKERA W., 2007), o comportamento de um fluido newtoniano pode ser descrito, de forma geral, por uma equação de transporte envolvendo uma variável genérica ϕ (que pode representar temperatura, pressão ou velocidade):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (4.20)$$

Em que:

ϕ : Variável de interesse

Γ : Coeficiente de difusão

S_ϕ : Termos de fonte ou geração

$\mathbf{u}$: Vetor de velocidade do fluido

ρ : Densidade do fluido

De forma conceitual, essa equação representa o balanço da taxa de variação da propriedade ϕ em um elemento de fluido, levando em conta a taxa de convecção, a difusão molecular e as fontes internas. Embora a abordagem apresentada com base na equação 4.20 seja para um fluido, a mesma pode ser usada para um meio sólido já que o fluido é considerado estacionário.

Sendo assim, considerando o regime permanente, estacionário e sem geração de calor, a equação 4.20 se simplifica para:

$$\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) = 0 \quad (4.21)$$

Em que:

Γ : coeficiente difusivo

ϕ : variável de interesse

Para obter a forma discreta do problema, realiza-se a integração da equação governante multiplicada pelas funções de forma ao longo de todo o domínio de solução, resultando em:

$$\int [\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)] N_i d\Omega = 0 \quad (4.22)$$

Em que:

Ω : domínio computacional

N_i : função de forma do nó i

Γ : coeficiente difusivo

ϕ : variável de interesse

Como as funções aproximantes não reproduzem exatamente o comportamento físico real, o resultado da discretização produz um resíduo, que deve ser minimizado segundo o método de ponderação de Galerkin. No software COMSOL Multiphysics, essa formulação é implementada por meio do Método de Galerkin de Penalidade Interior Simétrico (SIPG), que inclui um parâmetro de penalidade ajustável. Esse parâmetro deve ser suficientemente grande para garantir a estabilidade e a correta imposição das condições de contorno, mas não excessivo a ponto de tornar o sistema de equações mal condicionado.

Após a aplicação das condições de contorno e o tratamento dos resíduos, as equações locais de cada elemento são combinadas, originando o sistema global de equações que pode ser expresso na forma matricial:

$$[K] \vec{\phi} = \vec{P} \quad (4.23)$$

Em que:

$[K]$: matriz global de rigidez

$\vec{\phi}$: vetor de incógnitas nodais

$\vec{P}$: vetor global de carregamento

Essa formulação permite obter uma solução numérica aproximada para os campos de interesse em todo o domínio resolvendo o sistema de equações baseado na formatação matricial. Dessa forma garante-se boa precisão mesmo em problemas com geometrias complexas e condições não lineares.

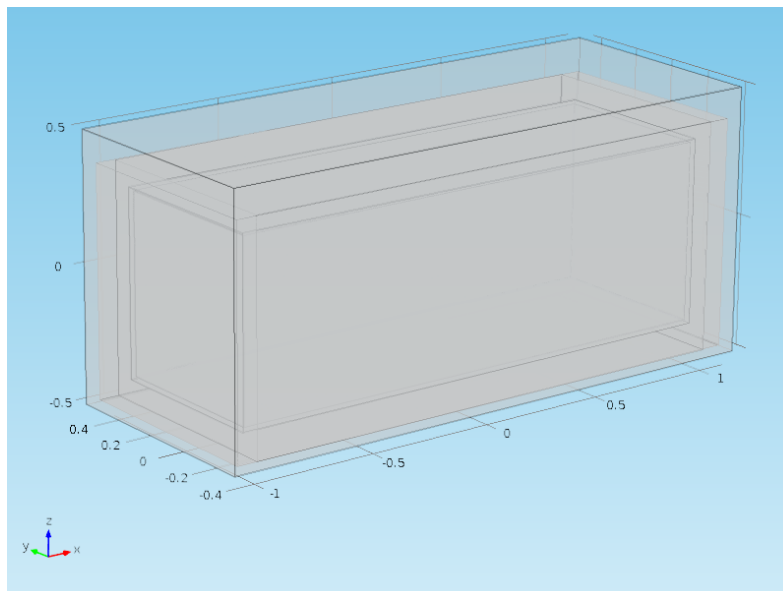
4.4. DETALHAMENTO GEOMÉTRICO

4.4.1. Descrição Da Geometria

A geometria foi modelada com base em uma autoclave industrial *Getinge* modelo 6710 conforme ilustrado anteriormente. Para fins de análise da dissipação de calor da câmara, componentes secundários, como tubulações, válvulas, gerador de vapor, condensador e sensores de

controle, foram desconsiderados, uma vez que possuem influência reduzida no comportamento térmico global do sistema. Dessa forma, a simulação foi desenvolvida considerando exclusivamente a câmara de esterilização, conforme apresentado na figura 7.

Figura 7 – Modelo completo da câmara de esterilização



Fonte: Próprio autor

O domínio computacional foi dividido em múltiplas regiões, correspondentes às diferentes camadas do equipamento, permitindo a aplicação adequada das propriedades térmicas e condições de contorno. A partir da análise da Figura 7, observa-se a presença de duas camadas de isolamento térmico: o isolamento secundário, localizado mais externamente, e o isolamento primário, disposto internamente a este. Adicionalmente, foi considerada a camada de contato com o vapor, representada pela região mais interna do modelo. Essas definições estão em conformidade com as considerações físicas previamente discutidas na Subseção 4.2.1.

4.4.2. Simplificações Geométricas

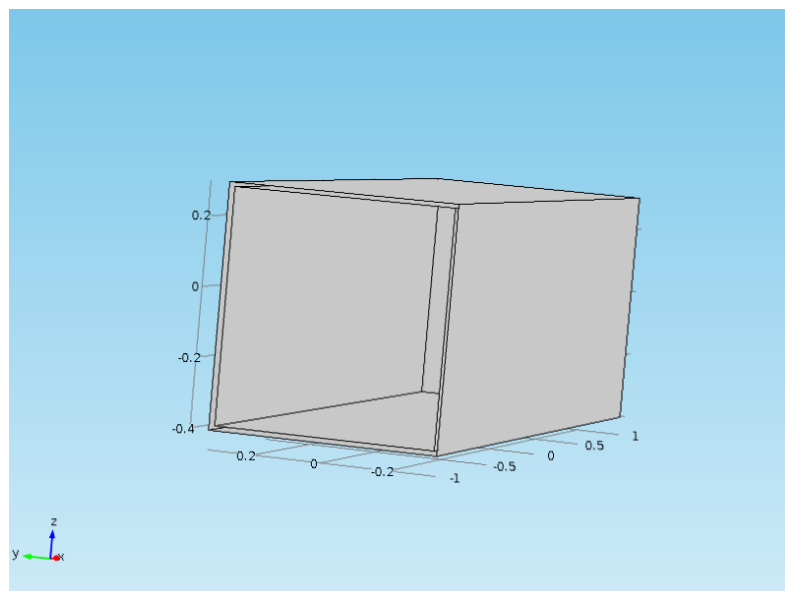
Com o objetivo de viabilizar a modelagem numérica e reduzir o custo computacional, foram adotadas simplificações geométricas no modelo da autoclave, mantendo-se, entretanto, as características essenciais para a adequada representação dos fenômenos de transferência de calor.

A geometria da autoclave foi representada de forma idealizada, assumindo superfícies lisas e contínuas, sem a consideração de irregularidades construtivas, rugosidades ou descontinuidades locais. Essa aproximação permite simplificar a discretização do domínio sem comprometer a precisão dos resultados térmicos.

A câmara de esterilização foi modelada como um domínio homogêneo e com simetria geo-

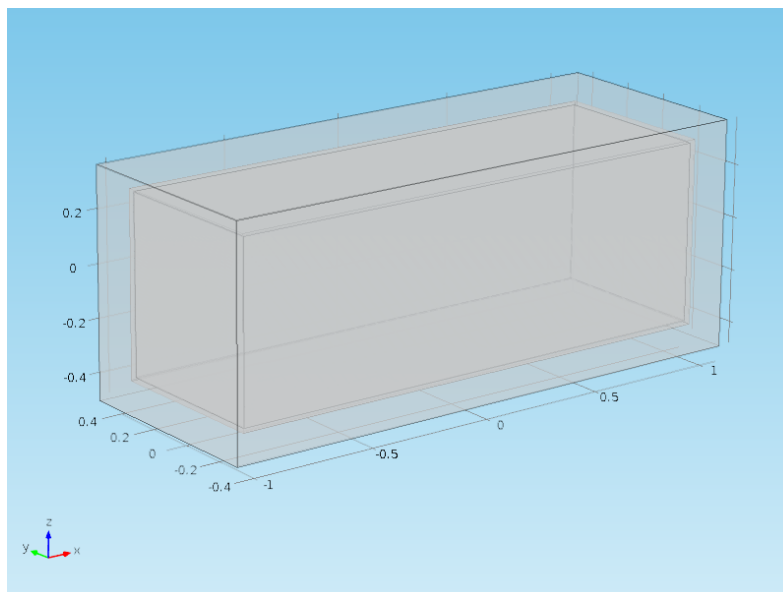
métrica, desconsiderando detalhes internos como suportes de carga, bandejas e materiais esterilizados como apresentado na Figura 8. Tal simplificação é justificada pelo fato de que o foco da análise está na transferência de calor através das paredes e nas perdas térmicas para o ambiente.

Figura 8 – Camada interior da câmara



Fonte: Próprio autor

Além disso, conforme discutido anteriormente, a câmara da jaqueta não foi explicitamente representada no modelo, sendo substituída por uma camada contínua de isolamento térmico conforme Figura 9. Essa abordagem é válida para a condição de regime estacionário adotada, na qual os gradientes térmicos já se encontram estabilizados.

Figura 9 – Isolamento primário

Fonte: Próprio autor

Por fim, considerou-se que todas as camadas do sistema (paredes metálicas e isolamentos) possuem espessuras uniformes ao longo de suas extensões, desconsiderando variações locais de material ou imperfeições construtivas, assim como apresentado na Figura 7.

4.4.3. Descrições Dimensionais

As dimensões da geometria modelada foram definidas com base nas características do equipamento real, buscando garantir a representatividade do comportamento térmico da autoclave durante o processo de esterilização. Para a análise, adotou-se uma configuração retangular horizontal simplificada, semelhante com a geometria do modelo utilizado.

Com o objetivo de tornar o modelo numericamente mais eficiente, algumas simplificações geométricas foram introduzidas. Em particular, as extremidades originalmente arredondadas da câmara foram aproximadas como superfícies planas, reduzindo a complexidade da malha e o custo computacional associado, sem comprometer de forma significativa a precisão dos resultados térmicos.

A tabela 2 descreve a dimensão e o posicionamento da referência central de cada objeto do modelo: câmara interna, isolamento primário e isolamento secundário.

Tabela 2 – Dimensões e posições dos domínios modelados

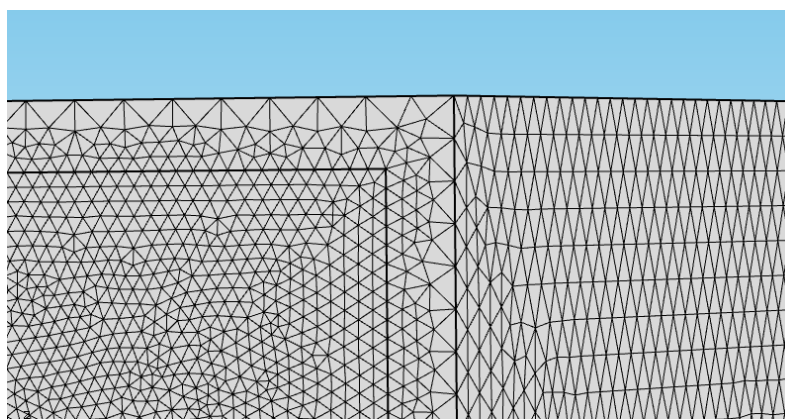
Domínio	Posição (coordenadas)			Comprimento (m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Câmara interna	0	0	0	2,000	0,700	0,672
Isolamento primário	0	0	0	2,160	0,832	0,860
Isolamento secundário	0	0	0,05	2,228	0,900	1,000

Fonte: Próprio autor.

4.5. DESENVOLVIMENTO DA MALHA

No *COMSOL*, a geração da malha pode ser realizada manualmente, por meio da opção *User Controlled Mesh*, ou de forma automática, utilizando o *Physics Controlled Mesh*, em que o próprio software a gera de acordo com o tipo de estudo definido e com o tamanho dos elementos do desenho. Todo o estudo foi constituído e analisado por meio de uma máquina com processador Intel Core i5, placa de vídeo Nvidia Geforce RTX3050 e 8Gb de memória Ram.

Em análises envolvendo sólidos, como no presente trabalho, a geração automática da malha permite um refinamento adequado em regiões críticas, como interfaces entre materiais ou zonas com maiores gradientes térmicos, garantindo maior precisão nos resultados, conforme ilustrado na Figura 10.

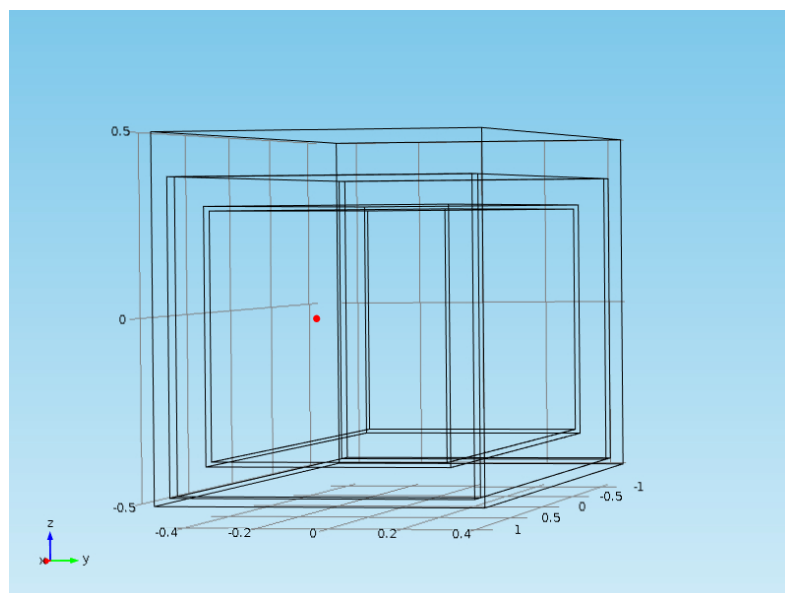
Figura 10 – Detalhe da malha entre a câmara e o isolamento primário.

Fonte: Próprio autor

A geração de malha automática foi utilizada para criação da malha e, para definição do tamanho dos elementos, fez-se um teste de convergência pontualmente na máquina, avaliando-se sua temperatura. Sendo assim, a análise foi feita considerando a temperatura de um ponto criado central em das portas do equipamento(P), conforme coordenadas $z(0)$, $y(0)$, $z(1,114)$ e Figura 11. Os valores são apresentados na Tabela 3.

Para referência da Tabela 3, Domain representa os elementos dentro do volume, Boundary os elementos da superfície e Edge os elementos nas arestas do desenho.

Figura 11 – Ponto (P)



Fonte: Próprio autor

Tabela 3 – Estudo de convergência de malha

Malha	Tipo de elemento	Quantidade	Temperatura no ponto P (°C)
Grosseira	Domain	42 288	39,917
	Boundary	15 652	
	Edge	910	
Normal	Domain	103 311	39,913
	Boundary	33 162	
	Edge	1 304	
Fina	Domain	304 972	39,911
	Boundary	79 566	
	Edge	1 820	
Extra fina	Domain	540 139	39,910
	Boundary	122 366	
	Edge	2 245	

Fonte: COMSOL Multiphysics.

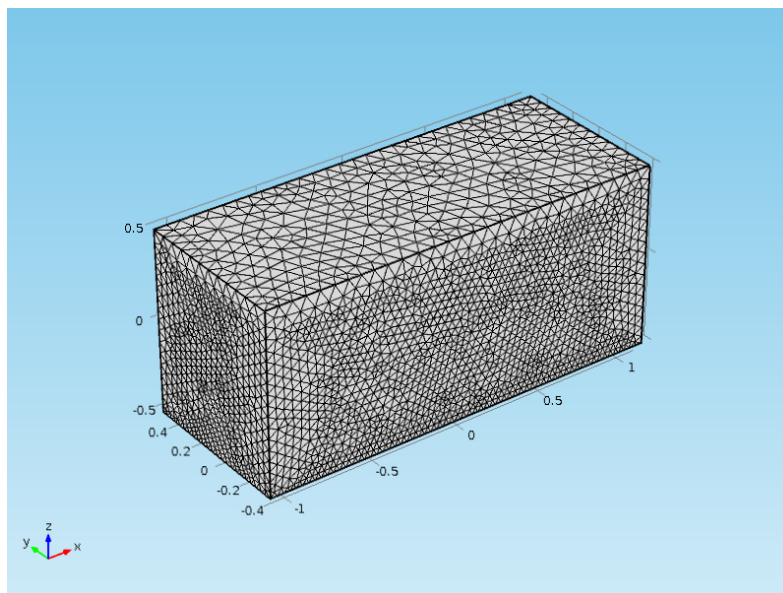
Com base no estudo de convergência realizado, verificou-se que o refinamento progressivo

da malha conduz a variações cada vez menores na temperatura no ponto P. Entre as malhas “Fina” e “Extra Fina”, a diferença observada é de apenas 0,001 °C, o que indica que a solução numérica se encontra praticamente convergida.

Por mais que haja níveis de refinamento superiores com maior quantidade de elementos, a sua utilização implica um aumento significativo do custo computacional, sem ganhos relevantes na precisão dos resultados. Assim, a malha “Extra Fina” apresenta-se como a melhor opção, garantindo um equilíbrio adequado entre precisão e eficiência computacional.

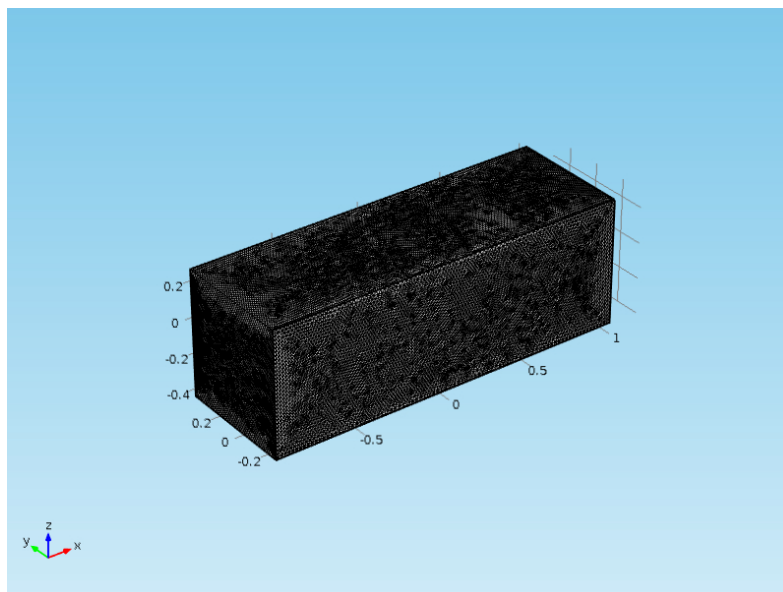
Assim, optou-se pela utilização da malha “Extra Fina” nas simulações, por esta assegurar resultados confiáveis. Dois exemplos das malhas criadas são apresentados para o equipamento completo e para a câmara de esterilização nas Figuras 12 e 13 respectivamente.

Figura 12 – Aplicação da malha *Mais Fina* - equipamento completo



Fonte: Próprio autor

Figura 13 – Aplicação da malha *Mais Fina* - câmara



Fonte: Próprio autor

4.6. CONDIÇÕES DE CONTORNO E PROPRIEDADES

As condições de contorno e as propriedades termo-físicas utilizadas na simulação foram definidas com base nas condições operacionais típicas da autoclave industrial durante o platô de esterilização, logo, em regime estacionário.

As condições de contorno aplicadas foram detalhas nos subitens seguintes, explicitando seus valores, locais de aplicação na geometria do modelo e simplificações.

Os subitens abaixo serão distribuídos primeiramente apresentando os locais de fenômenos térmicos, valores para desenvolvimento do modelo e validação e propriedades dos materiais.

4.6.1. Fenômenos Térmicos

4.6.1.1. Radiação

O equipamento encontra-se distribuído entre três ambientes distintos: sala de máquinas (laterais, fundo e topo), sala limpa e sala de operação (região das portas). Dessa forma, adotou-se como simplificação uma temperatura ambiente média equivalente para representação das condições externas de contorno, a qual será apresentada no tópico seguinte.

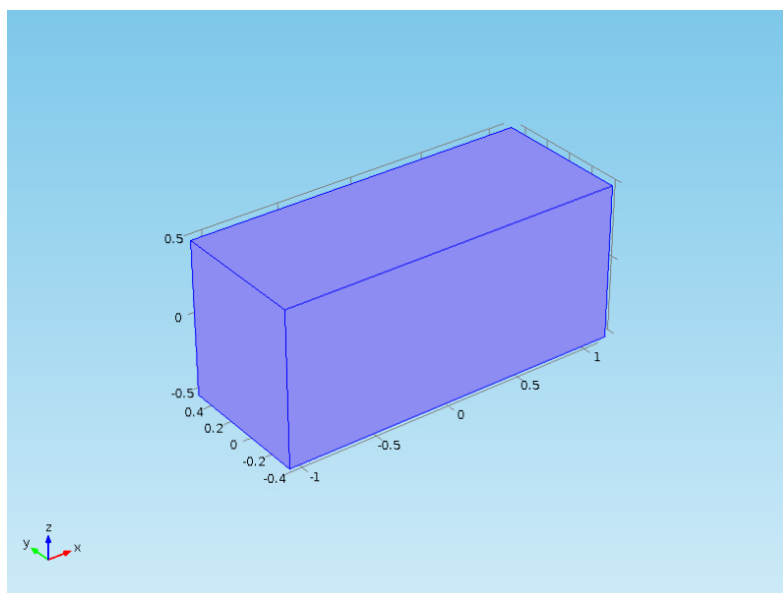
Todas as superfícies externas foram consideradas como superfícies difuso-cinzentas conforme apresentado na Figura 14, e a emissividade térmica foi definida com base nos valores típicos fornecidos para chapas de alumínio comercial, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Emissividade do material utilizado

Material	Emissividade
Chapa de alumínio comercial	0,10

Fonte: Adaptado de (FLUKE PROCESS INSTRUMENTS, 2025).

Essa aproximação foi adotada para representar o revestimento estrutural externo do equipamento. Embora o domínio sólido externo permaneça com as propriedades térmicas do isolamento secundário, a emissividade superficial utilizada no modelo corresponde à do alumínio comercial empregado no revestimento da autoclave.

Figura 14 – Superfícies com incidência de radiação

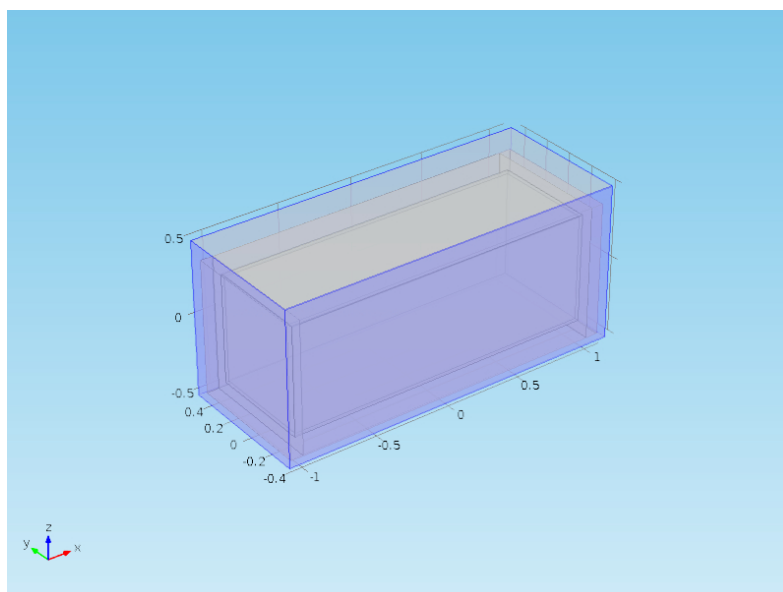
Fonte: Próprio autor

4.6.1.2. Convecção Natural

Em todas as superfícies que entram em contato diretamente com o ambiente, foram aplicadas condições de perda de calor por convecção natural.

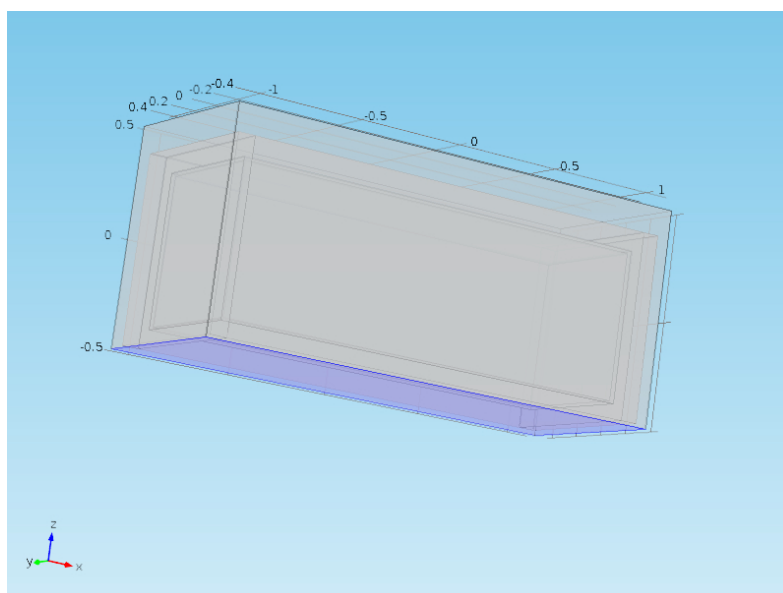
Por outro lado, de acordo com a placa/lado da autoclave em análise, diferentes condições de convecção foram assumidas - isso devido à orientação da placa e ao comprimento característico. A relação entre essas condições e as superfícies são tratadas nas Figuras 15, 16 e 17, em que se -tem as superfícies em destaque.

Figura 15 – Convecção natural - Lateral Externa da câmara

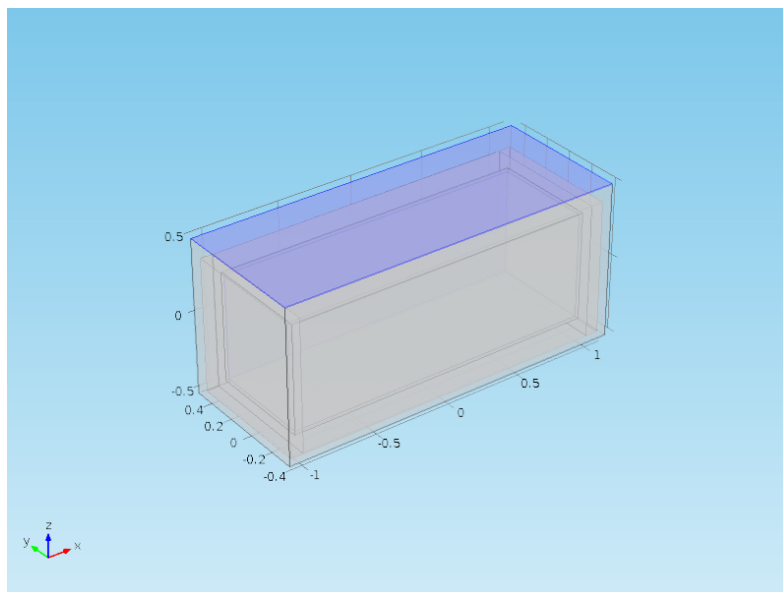


Fonte: Próprio autor

Figura 16 – Convecção natural - Base Externa da câmara



Fonte: Próprio autor

Figura 17 – Convecção natural - Topo Externo da câmara

Fonte: Próprio autor

4.6.1.3. Valores Para Construção E Validação

Para a construção e validação do modelo numérico, foi adotado um ciclo operacional de referência, no qual foram definidos o set-point de esterilização da câmara e a medição da temperatura ambiente do local para determinação da temperatura média a ser utilizada, conforme já detalhado acima. As condições térmicas utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Condições de temperatura utilizadas no modelo

Parâmetro	Temperatura (°C)
Set-point de temperatura da câmara	135,3
Temperatura da jaqueta	134,0
Temperatura ambiente	27,0

Fonte: Próprio autor.

Como o objetivo deste trabalho não consiste na análise fluidodinâmica do escoamento de vapor no interior da câmara, o set-point de esterilização foi utilizado como aproximação para a temperatura da superfície interna da câmara. Essa simplificação é coerente com a condição de regime estacionário adotada, na qual se assume pequena variação espacial da temperatura do vapor durante o platô de esterilização.

Além disso, embora a jaqueta exerça influência no aquecimento das paredes externas da câmara, sua geometria não foi explicitamente modelada, conforme discutido anteriormente nas

simplificações físicas do problema. Dessa forma, a temperatura da jaqueta não foi aplicada diretamente como condição de contorno independente, sendo seu efeito térmico representado indiretamente pela condição de temperatura imposta na parede interna da câmara.

4.6.1.4. Propriedades Dos Materiais

Toda a região da câmara interna do equipamento é formada por aço inox 316L, a camada de isolamento primário é formada por lã de vidro e a camada secundária por lã de rocha. O COMSOL não possui especificamente o material lã de rocha em sua biblioteca, porém, para considerar as propriedades não isotrópicas dos materiais fibrosos, especificou-se uma lã de vidro de maior densidade para representar as características da lã de rocha visto que apresentou valores de coeficiente convectivo mais satisfatórios durante o estudo.

A tabela 6 apresenta as relações utilizadas pelo *COMSOL* entre a condutividade térmica e a temperatura .

Tabela 6 – Função da condutividade térmica dos materiais utilizados no modelo

Material	$k(T)$
Aço inoxidável 316L	$k(T) = -0.575597 + 0.1484296 T + 1.184549 \times 10^{-5} T^2 - 6.696619 \times 10^{-6} T^3 + 2.25279 \times 10^{-8} T^4$
Lã de rocha	$k(T) = -7.123375 + 0.06143273 T - 1.733428 \times 10^{-4} T^2 + 1.616032 \times 10^{-7} T^3$
Lã de vidro	$k(T) = -8.216562 + 0.06949307 T - 1.927595 \times 10^{-4} T^2 + 1.766669 \times 10^{-7} T^3$

Fonte: COMSOL Multiphysics.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio da modelagem numérica desenvolvida para a análise térmica da autoclave industrial, com ênfase na avaliação da distribuição de temperatura, dos fluxos de calor e das perdas energéticas associadas à câmara durante o platô de esterilização. Com base nas equações governantes da condução, convecção natural e radiação, implementadas por meio do Método dos Elementos Finitos, torna-se possível compreender o comportamento térmico do sistema e identificar como ocorre a perda da energia térmica e como é o perfil de temperatura do equipamento.

Primeiramente, é apresentada a validação do modelo com o intuito de trazer robustez à todas às análises subsequentes. Em seguida, as temperaturas médias das superfícies e a análise dos campos de temperatura no interior da câmara e ao longo das camadas estruturais, identificando os gradientes térmicos e sendo feita a análise das camadas isolantes. Além disso, o fluxo de calor nas superfícies externas será analisado, possibilitando a quantificação das perdas térmicas e a determinação da potência dissipada pelo sistema, como também a análise da influência da radiação no sistema. A partir desses dados, é realizada uma análise do desempenho energético da autoclave.

Ademais, o capítulo propõe uma discussão crítica dos resultados obtidos, considerando as hipóteses adotadas no modelo, as simplificações geométricas e as limitações inerentes à abordagem numérica empregada. Dessa forma, busca-se não apenas apresentar os resultados da simulação, mas também interpretá-lo, fornecendo subsídios para a avaliação do desempenho do equipamento.

5.1. VALIDAÇÕES DO MODELO

Para a validação do modelo numérico desenvolvido, foram realizadas medições de temperatura na superfície lateral externa da autoclave utilizando um termômetro infravermelho previamente calibrado que possui tolerância de $\pm 1,5\%$ da leitura além de possuir um recurso de emissividade ajustável para garantir a precisão na medição de outros materiais, como metais brilhantes. Ao todo, foram efetuadas três medições em diferentes posições ao longo da altura do equipamento: uma região inferior localizada a 10 cm da base, uma região central e uma região superior posicionada a 10 cm do topo. Os valores experimentais obtidos são apresentados na Tabela 7. A Figura 22 apresenta o perfil de temperatura ao longo da linha de análise indicada em vermelho na Figura 21, bem como os pontos utilizados para as medições experimentais, os quais também estão representados nas Figuras 18, 19 e 20.

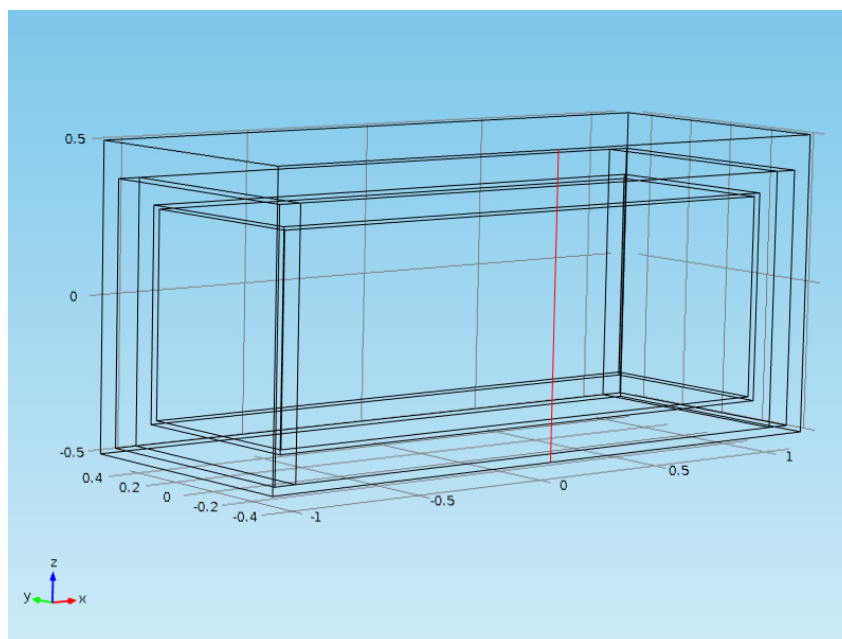
Tabela 7 – Temperaturas medidas nas regiões analisadas

Região	Temperatura (°C)
Superior	34,9
Central	37,0
Inferior	35,5

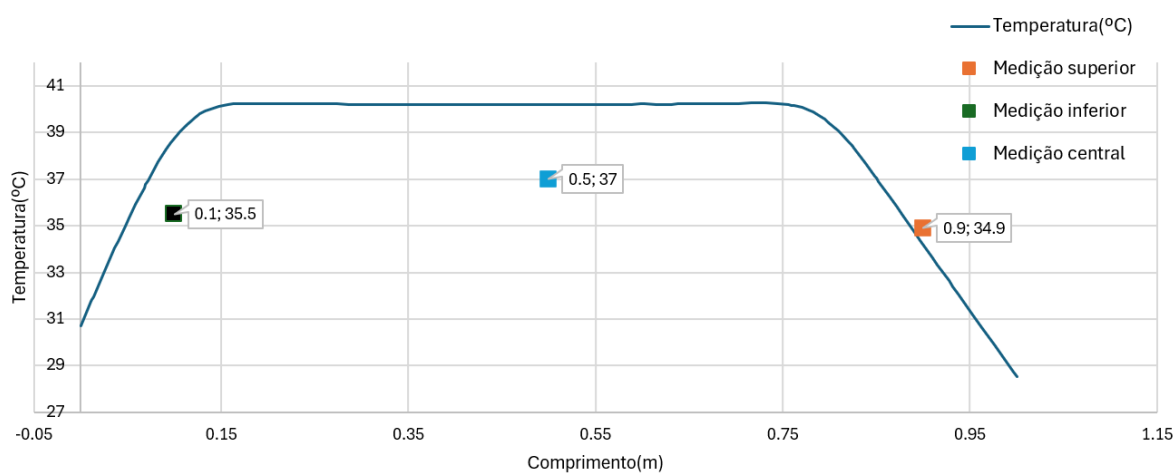
Fonte: Próprio autor.

**Figura 18** – Medição central**Figura 19** – Medição inferior
- 10 cm da base**Figura 20** – Medição superior
- 10 cm do topo

Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Referência para medição

Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Distribuição de temperatura na parede lateral - medições realizadas

Fonte: Próprio autor

Conforme apresentado na Figura 22 os resultados obtidos numericamente apresentaram boa concordância com os valores medidos experimentalmente mesmo considerando o possível erro associado às medições do termômetro. De acordo com Tabela 8, a maior diferença observada entre os valores calculados e medidos foi inferior a 10%, indicando que as simplificações e

hipóteses adotadas na construção do modelo não comprometeram significativamente a representatividade física da simulação. Dessa forma, o modelo desenvolvido demonstrou capacidade satisfatória de reproduzir o comportamento térmico real da autoclave em condições operacionais semelhantes às consideradas neste estudo, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos numericamente.

Tabela 8 – Comparação entre temperaturas medidas e calculadas

Região	Temperatura medida (°C)	Temperatura calculada (°C)	Erro percentual relativo
Superior	34,9	34,2	2,0%
Central	37,0	40,2	7,9%
Inferior	35,5	38,7	8,3%

Fonte: COMSOL Multiphysics.

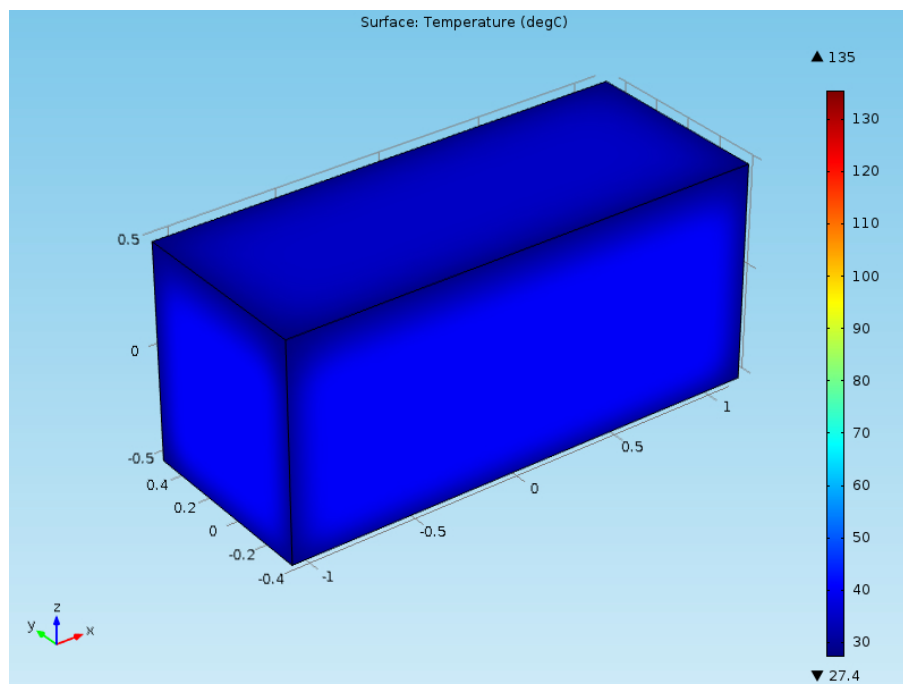
5.2. COMPORTAMENTO TÉRMICO

O estudo foi realizado conforme parâmetros já apresentados acima, condições de contorno, propriedades dos materiais, temperaturas selecionadas e simplificações geométricas.

5.2.1. Temperaturas Médias

Com o objetivo de realizar uma análise quantitativa do comportamento térmico da autoclave, foram determinadas as temperaturas médias, temperaturas máximas e as temperaturas mínimas regiões externas da estrutura conforme Figura 23. Esses parâmetros permitem avaliar não apenas o nível térmico médio das superfícies, mas também a uniformidade da distribuição de temperatura ao longo do equipamento, fornecendo informações relevantes sobre a eficiência do isolamento térmico e a homogeneidade do campo térmico obtido numericamente.

A temperatura média representa o comportamento térmico global de cada região analisada, enquanto a temperatura máxima permite identificar zonas críticas sujeitas a maiores perdas térmicas.

Figura 23 – Distribuição da temperatura externa

Fonte: Próprio autor

Uma vez que as paredes internas do equipamento foram definidas como a temperatura prescrita do set-point de esterilização, apenas os dados da temperatura externa são apresentados

Conforme apresentado na Tabela 9 as superfícies externas apresentaram temperaturas significativamente inferiores ao set-point, evidenciando a eficiência das camadas de isolamento térmico na redução da dissipação de calor para o ambiente. Observa-se também que a superfície superior externa apresentou temperaturas médias menores em relação às superfícies laterais e inferiores (camada mais espessa de isolante), enquanto a superfície inferior externa apresentou os maiores valores máximos de temperatura (camada mais fina de isolante) dentre as regiões externas analisadas.

Além disso, as maiores variações entre temperaturas médias, máximas e mínimas observadas nas superfícies externas estão associadas aos efeitos combinados de condução, convecção natural e radiação térmica.

Tabela 9 – Temperaturas das superfícies externas da autoclave

Superfície	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Direita	37,85	40,30	27,37
Esquerda	37,85	40,30	27,27
Frente	36,98	40,28	27,37
Fundo	36,97	40,28	27,37
Superior	32,88	34,83	27,37
Inferior	43,44	47,58	27,77

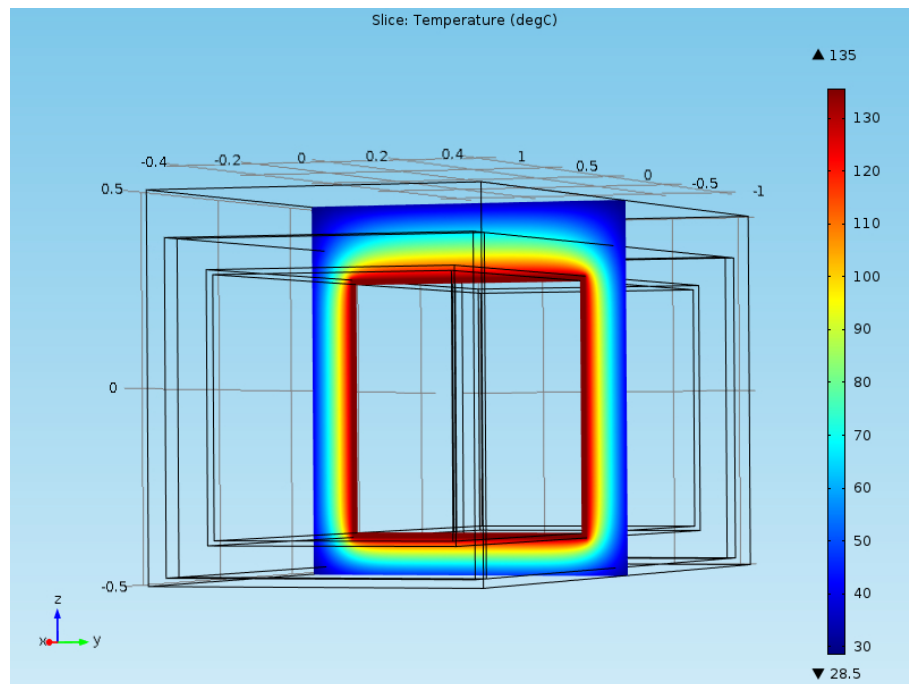
Fonte: COMSOL Multiphysics.

Os dados da Tabela 9 foram extraídos do próprio *COMSOL* por meio da função de "*Derived Values*" para cada superfície.

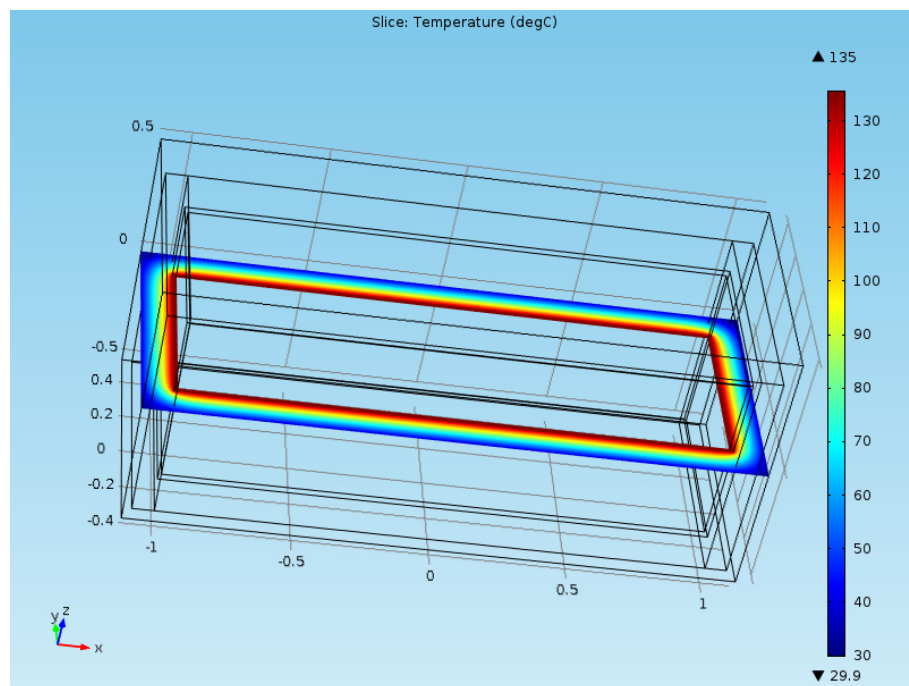
5.2.2. Planos

Conforme apresentado nas Figuras 24 e 25 observa-se comportamento térmico semelhante em todos os cortes equidistantes realizados ao longo da estrutura da autoclave, evidenciando a uniformidade da distribuição de temperatura tanto no interior, quanto no exterior do equipamento. Esse resultado era esperado devido às condições de contorno adotadas no modelo, nas quais a temperatura ambiente foi considerada constante na superfície externa, enquanto a temperatura de operação (set-point) permaneceu uniforme na região interna da câmara.

Adicionalmente, verifica-se que os maiores gradientes térmicos concentram-se nas regiões correspondentes às camadas de isolamento, enquanto a região interna apresenta temperatura totalmente homogênea, como já discorrido anteriormente. Esse comportamento demonstra a efetividade dos materiais isolantes na redução da dissipação térmica para o ambiente, além de indicar coerência física entre os resultados numéricos obtidos e o fenômeno de transferência de calor esperado para o sistema analisado.

Figura 24 – Corte longitudinal

Fonte: Próprio autor

Figura 25 – Corte latitudinal

Fonte: Próprio autor

Com a finalidade de complementar a análise qualitativa da distribuição térmica apresentada anteriormente, foram elaborados gráficos de temperatura em função da distância ao longo das paredes da autoclave - os dados foram extraídos do *COMSOL* e construídos na plataforma *Microsoft Excel*. Esses dados representam a temperatura central de cada parede. Essa abordagem permite avaliar de forma mais detalhada o comportamento do gradiente térmico através dos materiais isolantes, possibilitando a identificação das regiões de maior variação de temperatura e da influência das propriedades térmicas de cada material na dissipação de calor.

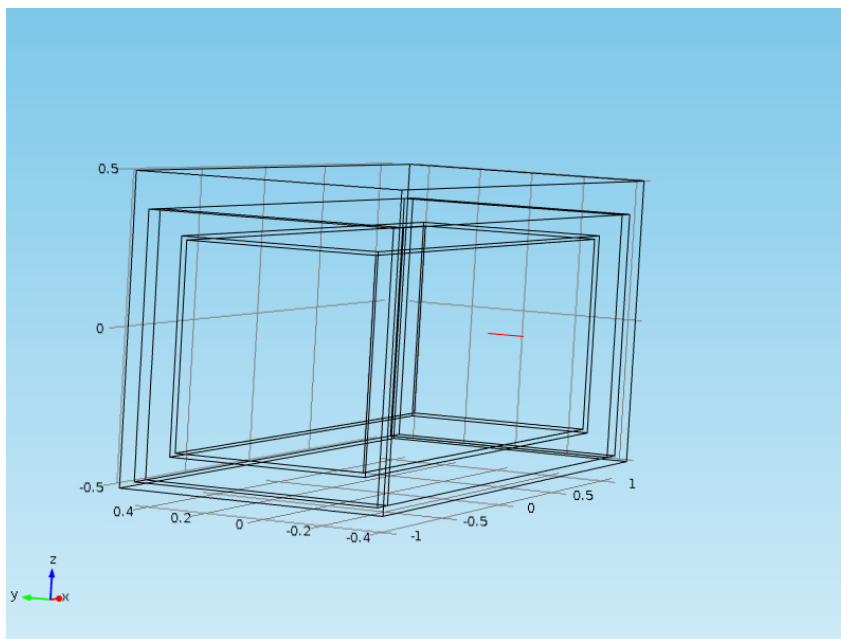
Além disso, os perfis obtidos possibilitam analisar a continuidade da transferência térmica entre as diferentes espessuras de camadas do sistema, evidenciando a atuação dos isolantes na redução das perdas energéticas para o ambiente externo.

Portanto, conforme figura 27, figura 29 e figura 30, observa-se que nas paredes em que a espessura da camada de lã de rocha é mais espessa, a temperatura da parede externa é ligeiramente menor, refletindo a interferência do isolante em sua finalidade.

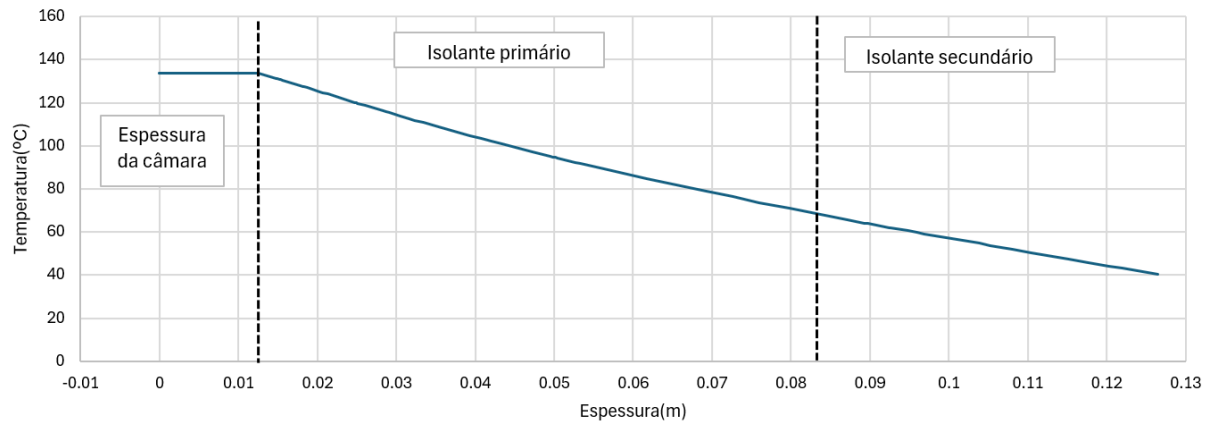
Como já informado, esses gráficos representam os valores centrais de cada superfície. Sendo assim, como os valores das temperaturas laterais, portas(frente e fundo), direita e esquerda conforme Tabela 9 são aproximadamente os mesmos, os valores são apresentados em um gráfico conjunto.

O perfil de temperatura da Figura 27 refere-se à linha vermelha central à lateral direita apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Linha de referência para figura 27

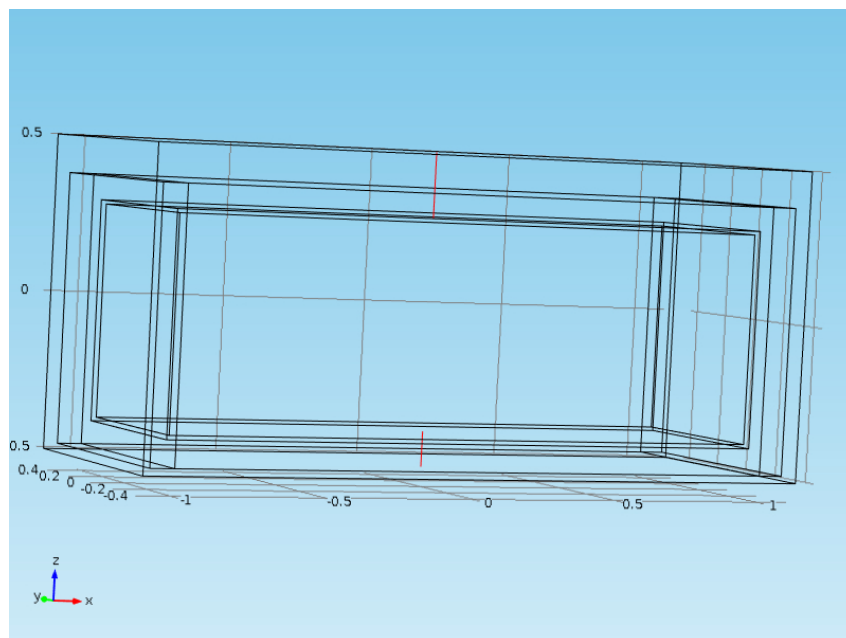


Fonte: Próprio autor

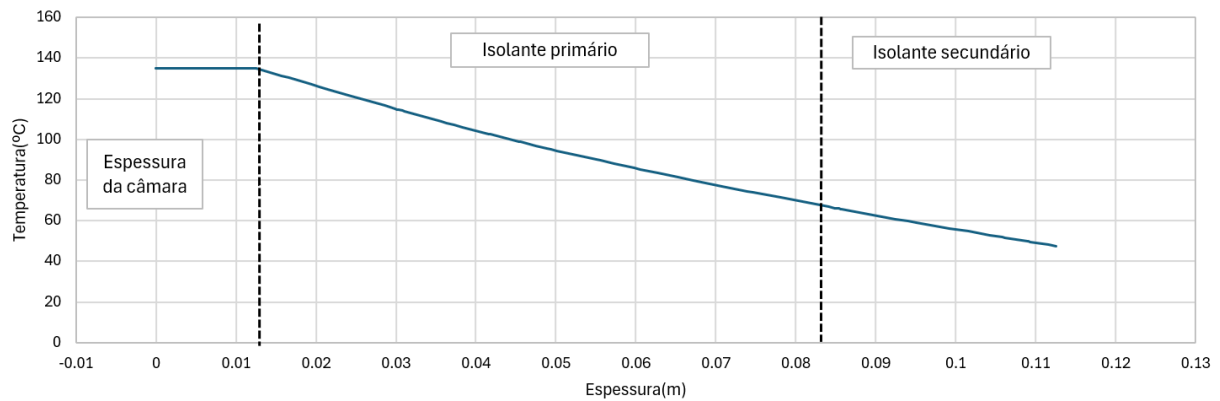
Figura 27 – T x E (Lateral e Porta)

Fonte: Próprio autor

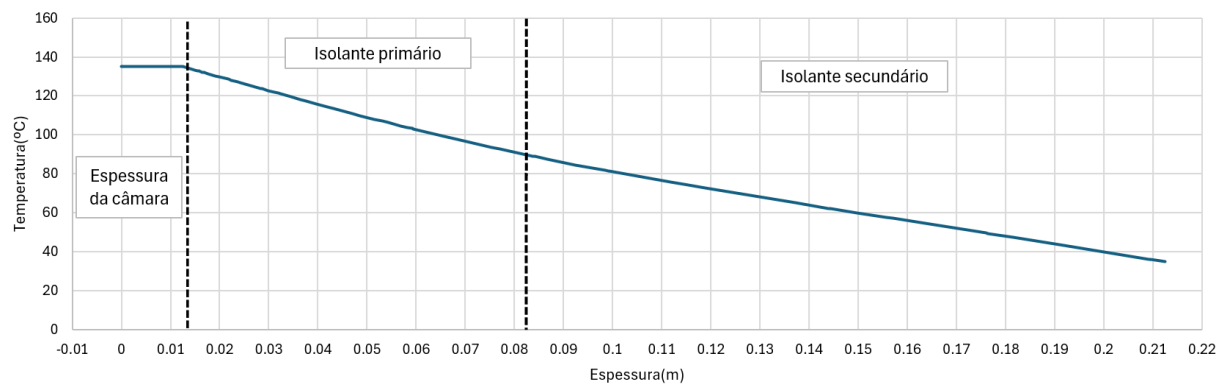
O perfil de temperatura das Figuras 29 e 30 referem-se às linhas vermelhas central inferior e superior respectivamente.

Figura 28 – Linha de referência para Figuras 29 e 30

Fonte: Próprio autor

Figura 29 – T x E (região inferior)

Fonte: Próprio autor

Figura 30 – T x E (Região superior)

Fonte: Próprio autor

Além da própria interferência da espessura dos isolantes, é perceptível, também pela Tabela 10 abaixo que a orientação da parede influencia diretamente na temperatura se analisarmos um local fixo - essa tabela foi construída avaliando exatamente com 0,08m de espessura de isolante, logo antes do fim da camada de Isolante primário. Essa variação também justifica a espessura maior do Isolante secundário na superfície superior, de modo que a temperatura externa não exerça perigo ao operador ou manutentor. Esse tipo de comportamento na parte superior do equipamento ocorre devido ao comportamento do fluido externo em uma placa superior resfriada internamente.

Tabela 10 – Temperatura a 0,08 m da parede interna da autoclave

Região	Temperatura (°C)
Portas e laterais	70,90
Superfície inferior	91,25
Superfície superior	70,12

Fonte: COMSOL Multiphysics.

5.3. PARCELA DE CONTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO

Em uma parede composta cuja temperatura superficial está próxima da temperatura do ambiente, a transferência de calor por radiação térmica tende a ter uma contribuição menor em relação à condução através das camadas da parede. Nessa condição, como a diferença de temperatura entre a superfície e o meio externo é pequena, a troca radiativa reduz significativamente sua intensidade, apesar de depender da quarta potência da temperatura absoluta. Assim, o processo de condução normalmente permanece predominante no interior da parede, enquanto a radiação atua como um mecanismo complementar nas superfícies, geralmente associada à convecção do ar. Em aplicações de engenharia térmica em temperaturas ambientes, a radiação costuma representar apenas uma parcela moderada da transferência total de calor, tornando-se mais relevante apenas em situações com temperaturas elevadas ou grandes diferenças térmicas.

Para analisar a influência direta da radiação neste modelo, um outro estudo foi realizado, porém, dessa vez, sem a atuação da radiação na superfície. Os dados são analisados usando como referência a parede lateral do equipamento.

Conforme Tabela 11 abaixo, observa-se a diferença mínima entre os valores da temperatura média, máxima e mínima da parede externa direita isso é devido, como já apresentado, à temperatura da parede externa estar bem próxima da temperatura ambiente.

Tabela 11 – Influência da radiação térmica na lateral externa direita da autoclave

Condição	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Com efeito da radiação	37,85	40,30	27,37
Sem efeito da radiação	38,96	41,56	27,61

Fonte: COMSOL Multiphysics.

5.4. FLUXO TÉRMICOS NAS SUPERFÍCIES

Nesta seção são analisados os fluxos térmicos nas superfícies externas da autoclave em regime permanente, considerando os mecanismos de transferência de calor previamente definidos no modelo numérico. A avaliação das perdas térmicas em cada parede do equipamento possi-

bilita quantificar a dissipação energética para o ambiente e identificar as regiões mais críticas do ponto de vista térmico. Os valores correspondentes à dissipação térmica por cada parede é apresentado pela tabela 12 abaixo:

Tabela 12 – Energia dissipada por superfície

Superfície	Calor dissipado (W/m ²)	Área (m ²)	Energia dissipada (W)
Laterais (2x)	38,51	2,23	171,60
Superior	22,61	2,01	45,33
Inferior	40,94	2,01	82,08
Portas (2x)	34,00	0,90	61,20
Energia total dissipada			593,02

Fonte: COMSOL Multiphysics.

Tabela 13 – Propriedades termodinâmicas do vapor na câmara

Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Volume específico (m ³ /kg)	Volume da câmara (m ³)	Massa (kg)	Energia (kJ)
135,30	2727,30	0,58	0,95	1,64	4463,37

Fonte: Adaptado de (YUNUS A. ÇENGEL; MICHAEL A. BOLES, 2013) e COMSOL Multiphysics.

Com base nos resultados obtidos tanto da energia dissipada quanto da energia do vapor, Tabela 12 e Tabela 13 verifica-se que a câmara apresenta uma dissipação térmica total de 593,02 W, sendo as laterais as principais responsáveis pelas perdas de calor devido à maior área superficial. As portas também apresentaram contribuição significativa nas perdas térmicas do sistema.

Além disso, para a temperatura de 135,5 °C, o vapor presente na câmara armazena aproximadamente 4463,37 KJ de energia, demonstrando elevada capacidade térmica para manutenção das condições operacionais.

5.5. ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA AUTOCLAVE DURANTE O AQUECIMENTO

Embora o modelo numérico desenvolvido neste trabalho tenha sido elaborado considerando o regime estacionário correspondente ao platô de esterilização, realizou-se adicionalmente uma estimativa simplificada da eficiência energética da autoclave. Como base para o estimativa da eficiência, as equações apresentadas na seção 4.2.2.4 foram usadas.

Os parâmetros utilizados para estimativa da eficiência são apresentados abaixo:

Tabela 14 – Parâmetros utilizados na estimativa da eficiência energética

Parâmetro	Valor
$Q_{dissipada}$	593,02 W
t	1080 s
m	527 kg
C_p	533,86 J/(kg·K)
ΔT	108,30 K

Fonte: COMSOL Multiphysics.

O tempo apresentado é o tempo médio para aquecimento considerando também o tempo de estabilização da temperatura interna da câmara de esterilização. O ΔT é a diferença entre a temperatura interna prescrita e a temperatura da vizinhança. A energia dissipada, o C_p e a massa foram extraídos pelo *COMSOL* por meio da ferramenta de *Derived Values*.

Não menos importante, vale pontuar que o tempo para aquecimento da câmara pode variar conforme capacidade do gerador de vapor em disponibilizar vapor para câmara.

Os valores calculados são apresentados na tabela 15 abaixo:

Tabela 15 – Resumo das etapas de cálculo do balanço energético e eficiência

Etapas / Grandeza	Resultado final
$Q_{armazenada}$	30469,58 kJ
$Q_{perdida}$	640,46 kJ
$Q_{entrada}$	31110,04 kJ
η	97,9%

Fonte: Próprio autor.

Embora esta análise possua caráter simplificado — dado que o modelo numérico principal foi desenvolvido em regime estacionário e não contempla explicitamente a evolução temporal do aquecimento —, a eficiência calculada indica que o material isolante e sua respectiva espessura foram dimensionados adequadamente. Apesar dessas limitações, a abordagem adotada fornece uma projeção coerente da distribuição energética do processo, evidenciando o impacto das perdas térmicas sobre o desempenho global do sistema.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo térmico numérico de uma autoclave industrial utilizando o Método dos Elementos Finitos no software *COMSOL Multiphysics*, com o objetivo de avaliar a dissipação de calor pelo sistema de isolamento durante o platô de esterilização.

Inicialmente, foi realizado o levantamento das principais características operacionais do equipamento, incluindo parâmetros de temperatura, tempo de ciclo e propriedades térmicas dos materiais utilizados na construção da autoclave. Essas informações permitiram estabelecer as condições necessárias para o desenvolvimento do modelo numérico.

Em seguida, foi desenvolvida a modelagem térmica da autoclave industrial, considerando os mecanismos de condução, convecção natural e radiação térmica. O modelo permitiu representar o comportamento térmico do equipamento e identificar as regiões de maior dissipação de calor para o ambiente.

Além disso, foi realizado o balanço térmico da câmara, possibilitando estimar as perdas energéticas do sistema durante o processo de esterilização. Os resultados demonstraram a influência do isolamento térmico na retenção de calor e na redução das perdas para o ambiente externo.

Por fim, foi estimada a eficiência energética simplificada em regime estacionário, permitindo avaliar de forma aproximada o aproveitamento da energia fornecida ao sistema.

De maneira geral, os resultados obtidos apresentaram comportamento coerente com as condições físicas esperadas, indicando que o modelo desenvolvido foi adequado para a análise térmica proposta. O trabalho também demonstrou a aplicabilidade do Método dos Elementos Finitos como ferramenta de apoio à análise e avaliação de equipamentos térmicos industriais.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade do presente trabalho, sugere-se a realização de uma análise térmica transiente da autoclave industrial ao longo de todas as etapas do ciclo de esterilização. Diferentemente da abordagem em regime estacionário adotada neste estudo, uma modelagem transiente permitiria avaliar a evolução temporal da temperatura nas paredes, isolamentos e no ambiente interno do equipamento, representando de forma mais fiel os fenômenos físicos envolvidos durante o aquecimento e resfriamento da autoclave.

Além disso, uma abordagem transiente possibilitaria a obtenção de estimativas mais precisas da eficiência energética do processo, considerando a variação temporal das perdas térmicas e do armazenamento de energia no sistema ao longo do ciclo operacional.

Também é recomendada a inclusão explícita da jaqueta de aquecimento no modelo numérico, permitindo investigar com maior detalhamento sua influência na uniformidade térmica das paredes da câmara e na redução da condensação do vapor saturado durante o aquecimento.

Por fim, sugere-se a realização de validações experimentais adicionais, incluindo medições quantitativas de fluxo térmico e consumo energético, visando ampliar a confiabilidade do modelo numérico desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, W. d. Eficiência energética de um gerador de vapor através do método indireto. v. 3, n. 4, 2000. Disponível em: <<https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/12176>>.
- ARNAN BEN-DAVID. Flexible Loading Pattern Approach in Overkill Steam Sterilization Based on the Physical Properties of Steam and Thermodynamics of Sterilization. v. 7, 2023.
- BRITISH STANDARD. **BS EN 285:2015**. [S.l.]: BSI, 2015.
- EMERSON APARECIDO MIGUEL. Analysis of Water Quality over Noncondensable Gases Concentration on Steam Used for Sterilization, 2022.
- FEURHUBER, M. Prediction of the Fluid Flow, Heat Transfer and Inactivation of Microorganism at Medical Devices in Modern Steam Sterilizers Using Computational Fluid Dynamics, 2017.
- _____. CFD Investigation of Non-Condensable Gases in Vacuum and Non-Vacuum Steam Sterilizers, 2018.
- FLUKE PROCESS INSTRUMENTS. **Emissivity of Metals**. [S.l.: s.n.], 2025. Disponível em: <<https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-metals>>.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos Da Transferência de Calor e Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- J. BOWIE; J. KELSEY; G. THOMPSON. **Lancet**. [S.l.: s.n.], 1963. v. 281.
- J. P. C. M. VAN DOORNALEN. Measuring non-condensable gases in steam. **REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS**, p. 84, 2013.
- JENA, S.; GUPTA, A. Review on Pressure Sensors: A Perspective from Mechanical to Micro-Electro-Mechanical Systems. **Sensor Review**, Emerald Publishing Limited, v. 41, n. 3, p. 320–329, jan. 2021. Acesso em: 8 jul. 2025.
- LACHMAN, L. **Teoria e Prática Na Indústria Farmaceutica**. [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.
- LESZEK PIECHOWSKI; ADAM MUC; JAN IWASZKIEWICZ. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence. **Multidisciplinary Digital Publishing Institute - Energy**, 2021.
- MALALASKERA W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. [S.l.: s.n.], 2007.
- MARCEL DION; WAYNE PARKER. Steam Sterilization Principles. v. 33, n. 6, 2013.

MEDSOLUT. **High-pressure autoclaves, steam autoclaves, vacuum autoclaves - a comparison: The autoclave in focus.** [S.l.: s.n.], 2025. Disponível em:

<https://medsolut.com/en/blog/high-pressure-autoclaves-steam-autoclaves-vacuum-autoclaves-a-comparison-the-autoclave-in-focus/?utm_>.

SAHIN, M. E. AUTOCLAVE DEVICE EXERGY AND ENERGY ANALYSIS IN HOSPITAL STERILIZATION UNITS. **Thermal Science**, v. 26, n. 4, p. 7, 2022.

YUNUS A. ÇENGEL; MICHAEL A. BOLES. **Termodinâmica**. 7. ed. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2013.