



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE**  
**ALIMENTOS**

**ÍCARO GONÇALVES AZEVEDO VINHAL BORGES**

**DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA REDUÇÃO DA**  
**CARGA MICROBIANA DO LEITE POR MEIO DA RADIAÇÃO UV-C**

**FORTALEZA**

**2025**

ÍCARO GONÇALVES AZEVEDO VINHAL BORGES

DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA REDUÇÃO DA  
CARGA MICROBIANA DO LEITE POR MEIO DA RADIAÇÃO UV-C

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Produtos de origem animal.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Juliane Döering  
Gasparin Carvalho  
Coorientador: Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira  
Carvalho Filho

FORTALEZA

2025

ÍCARO GONÇALVES AZEVEDO VINHAL BORGES

DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA REDUÇÃO DA  
CARGA MICROBIANA DO LEITE POR MEIO DA RADIAÇÃO UV-C

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Produtos de origem animal.

Aprovada em: 15/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Juliane Döering Gasparin Carvalho (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Laura Maria Bruno  
Embrapa Agroindústria Tropical

---

Dr. Joacir Soares de Andrade  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
do Ceará (IFCE)

## RESUMO

A indústria de laticínios usa a pasteurização para reduzir microrganismos no leite, mas a alta temperatura pode alterar suas características sensoriais e tecnológicas. Por isso, pesquisas estão sendo realizadas para substituir o tratamento térmico por outras tecnologias, como a irradiação ultravioleta (UV). O principal desafio deste tratamento não térmico é a baixa penetração da luz em alimentos com densidade óptica maior que a da água, como o leite. Este trabalho visou projetar um aparato experimental que utiliza luz UV-C para reduzir a carga microbiana do leite. O aparato experimental foi projetado inspirado em equipamentos observados na literatura, simulando suas condições de uso. O aparato experimental consolidado apresentou duas regiões principais: a região de aplicação UV-C, composta por uma lâmpada circundada de um duto helicoidal, e a região de controle do processo e recirculação do leite. Para definição dos tratamentos a serem aplicados, foram executados ensaios utilizando leite estéril inoculado com *Escherichia coli* (ATCC 25922,  $10^6$  UFC/mL) e submetido às doses de UV-C de 13,45 (T1), 29,02 (T2) e 66,53 kJ/m<sup>2</sup> (T3). Com base nos ensaios supracitados, o leite cru de uma indústria de laticínios do Ceará (Brasil) foi tratado sob as condições mais eficazes para redução microbiana (T1 e T2). As amostras foram avaliadas quanto aos parâmetros físico-químicos (pH, acidez, cor, viscosidade, densidade e crioscopia), contagens microbianas (bactérias mesófilas, *Staphylococcus* spp., Enterobacteria, *E. coli*) e alterações estruturais usando FTIR. Ambos os tratamentos com UV-C reduziram os grupos microbianos: *Staphylococcus* spp. (~4 log), bactérias mesófilas, enterobactérias (~2 log) e *E. coli* (~3 log), com T2 alcançando maiores reduções de mesófilos e enterobactérias. T1 proporcionou equilíbrio entre eficiência na redução microbiana e menor tempo de exposição. De forma geral, as alterações físico-químicas foram mínimas, permanecendo dentro dos padrões regulatórios. O aparato experimental demonstrou potencial para expansão em larga escala no processamento de laticínios.

**Palavras-chave:** contaminação alimentar; *Escherichia coli*; tecnologias não-térmicas; tratamento UV-C.

## ABSTRACT

The dairy industry uses pasteurization to reduce microorganisms in milk, but the high temperature can alter its sensory and technological characteristics. Therefore, research is being conducted to replace heat treatment with other technologies, such as ultraviolet (UV) irradiation. The main challenge of this non-thermal treatment is the low light penetration in foods with an optical density higher than that of water, such as milk. This work aimed to design an experimental apparatus that uses UV-C light to reduce the microbial load of milk. The experimental apparatus was designed inspired by equipment observed in the literature, simulating its conditions of use. The consolidated experimental apparatus presented two main regions: the UV-C application region, composed of a lamp surrounded by a helical duct, and the process control and milk recirculation region. To define the treatments to be applied, tests were carried out using sterile milk inoculated with *Escherichia coli* (ATCC 25922,  $10^6$  CFU/mL) and subjected to UV-C doses of 13.45 (T1), 29.02 (T2) and 66.53 kJ/m<sup>2</sup> (T3). Based on the tests, raw milk from a dairy industry in Ceará (Brazil) was treated under the most effective conditions for microbial reduction (T1 and T2). The samples were evaluated for physicochemical parameters (pH, acidity, color, viscosity, density, and cryoscopy), microbial counts (mesophilic bacteria, *Staphylococcus* spp., Enterobacteria, *E. coli*), and structural changes using FTIR. Both UV-C treatments reduced the microbial groups: *Staphylococcus* spp. (~4 log), mesophilic bacteria, enterobacteria (~2 log) and *E. coli* (~3 log), with T2 achieving greater reductions in mesophilic and enterobacteria. T1 provided a balance between efficiency in microbial reduction and shorter exposure time. Overall, the physicochemical changes were minimal, remaining within regulatory standards. The experimental apparatus demonstrated potential for large-scale expansion in dairy processing.

**Keywords:** food contamination; *Escherichia coli*; non-thermal technologies; UV-C treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Produção de leite do Brasil (em bilhões de litros) de 2000 a 2020. ....	15
Figura 2	– Média anual de leite cru (m <sup>3</sup> ), resfriado ou não, industrializado no estado do Ceará no intervalo histórico de 1997 a 2023. ....	16
Figura 3	– Comparação de diferentes métodos para a redução de (a) bactérias totais (b) coliformes e (c) leveduras e fungos em amostras de leite. ....	19
Figura 4	– Mecanismo de ação da irradiação UV-C na inativação microbiana. ....	20
Figura 5	– Esquema integrado de reatores UV-C para tratamento de fluidos alimentícios, incluindo modelo geral, arranjos estacionário, encamisado e helicoidal. ....	23
Figura 6	– Fluxograma de etapas metodológicas para o desenvolvimento, utilização e consolidação do aparato experimental de radiação UV-C em leite. ....	28
Figura 7	– Esquema ilustrativo do aparato experimental e seus componentes para radiação UV-C em leite. ....	29
Figura 8	– Medições da intensidade UV-C na seção irradiada com diferentes materiais de duto. ....	32
Figura 9	– Posicionamento do sensor GUVA-S12SD para medição da irradiância UV-C. ....	33
Figura 10	– Diferentes perspectivas do aparato experimental para aplicação de radiação UV-C em leite. ....	42
Figura 11	– Intensidade da radiação UV-C (254 nm) em função da interferência dos materiais da tubulação: PTFE, PVC e condição livre. ....	48
Figura 12	– Registro fotográfico das amostras de leite UHT inoculadas com <i>E. coli</i> frente a diferentes níveis de radiação aplicada. ....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil temporal da irradiância UV-C no aparato experimental... ..	46
Gráfico 2 – Espectros de absorção no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) de amostras de leite líquido controle e submetidas à radiação UV-C.....	67
Gráfico 3 – Espectros de absorção no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) de amostras de leite liofilizado controle e submetidas à radiação UV-C.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação de reatores UV-C para alimentos fluidos com base na literatura.....	22
Tabela 2	– Parâmetros de tratamento UV-C em fluidos lácteos citados na literatura científica .....	26
Tabela 3	– Distribuição das amostras de leite cru entre os tratamentos selecionados e controle, com respectivas repetições experimentais.....	37
Tabela 4	– Classificação dos Regimes de Escoamento com Base nos Números de Reynolds ( $Re$ ) e Dean ( $De$ )... ..	38
Tabela 5	– Variáveis Fixas do Sistema UV-C no aparato experimental .....	43
Tabela 6	– Temperatura registrada no equipamento e no leite durante os tratamentos UV-C .....	44
Tabela 7	– Dados referentes à regressão linear do aparato experimental para aplicação da radiação UV-C em leite. ....	47
Tabela 8	– Irradiância média e doses acumuladas de radiação UV-C para cada tempo de exposição do leite tratado. ....	47
Tabela 9	– Valores experimentais das doses UV-C emitidas pela lâmpada e doses efetivas considerando a transmitância do PTFE .....	49
Tabela 10	– Contagem microbiana de <i>E. coli</i> nas amostras de leite UHT inoculado e irradiado com diferentes doses de UV-C .....	51
Tabela 11	– Contagem microbiana de mesófilos, <i>Staphylococcus aureus</i> , enterobactérias e <i>E. coli</i> em amostras de leite cru e submetidas à radiação UV-C .....	53
Tabela 12	– Parâmetros hidrodinâmicos do aparato experimental para aplicação da radiação UV-C em distribuição helicoidal de leite .....	61
Tabela 13	– Parâmetros físico-químicos de amostras de leite cru irradiadas com diferentes doses de UV-C e a legislação vigente .....	62
Tabela 14	– Valores de pH e viscosidade das amostras de leite cru controle e das amostras submetidas à radiação UV-C .....	63
Tabela 15	– Valores das coordenadas de cor $L^*$ , $a^*$ e $b^*$ das amostras de leite cru controle e as submetidas à radiação UV-C .....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	13
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	13
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	13
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
<b>3.1</b>	<b>Aspectos gerais relacionados ao leite</b> .....	14
<b>3.1.1</b>	<i>Produção leiteira e indústria de laticínios do Brasil</i> .....	14
<b>3.1.2</b>	<i>Produção leiteira e indústria de laticínios do estado do Ceará</i> .....	16
<b>3.2</b>	<b>Segurança microbiológica e Tratamento térmico do leite</b> .....	17
<b>3.3</b>	<b>Utilização de tecnologias não térmicas para o tratamento do leite</b> .....	18
<b>3.4</b>	<b>O efeito e a utilização da luz UV-C para tratamento de leite</b> .....	20
<b>3.5</b>	<b>Equipamentos emissores de luz UV-C para tratamento de leite</b> .....	21
<b>3.6</b>	<b>Parâmetros envolvidos nos tratamentos UV-C de fluidos alimentícios</b> .....	25
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	28
<b>4.1.1</b>	<b>Projeção e seleção de materiais para o desenvolvimento do aparato experimental</b> .....	28
<b>4.1.2</b>	<i>Modelo proposto</i> .....	28
<b>4.1.3</b>	<i>Materiais para construção do aparato experimental de radiação UV-C</i> .....	30
<b>4.1.4</b>	<i>Avaliação da transmitância dos dutos na seção de aplicação do UV-C</i> .....	31
<b>4.1.5</b>	<i>Avaliação da dose UV-C emitida pela lâmpada</i> .....	32
<b>4.2</b>	<b>Funcionamento e manutenção do aparato experimental de radiação UV-C</b> .....	34
<b>4.2.1</b>	<i>Aplicação do tratamento através do aparato experimental de radiação UV-C</i> .....	34
<b>4.2.2</b>	<i>Limpeza do aparato experimental de radiação UV-C</i> .....	34
<b>4.3</b>	<b>Validação dos tratamentos UV-C aplicados pelo aparato experimental</b> .....	35
<b>4.3.1</b>	<i>Amostras de leite utilizadas</i> .....	35
<b>4.3.1.1</b>	<i>Eficácia do tratamento de radiação UV-C em diferentes tipos de leite</i> .....	35
<b>4.3.1.2</b>	<i>Ativação da cultura estoque de E. coli</i> .....	35
<b>4.3.1.3</b>	<i>Seleção dos tratamentos de radiação UV-C em leite UHT inoculado com E. coli</i> .....	36
<b>4.3.1.4</b>	<i>Aplicação dos tratamentos selecionados nas amostras de leite cru</i> .....	36
<b>4.4</b>	<b>Avaliação microbiológica das amostras de leite cru irradiadas</b> .....	37
<b>4.5</b>	<b>Análise do Regime de Escoamento: Números de Reynolds e Dean</b> .....	38

<b>4.6</b>	<b>Estudo comparativo das propriedades intrínsecas das amostras de leite cru irradiadas e não irradiadas .....</b>	<b>39</b>
4.6.1.1	<i>Caracterização físico-química das amostras de leite cru irradiadas e não irradiadas.....</i>	39
4.6.1.2	<i>Potencial hidrogeniônico (pH) .....</i>	39
4.6.1.3	<i>Acidez titulável.....</i>	39
4.6.1.4	<i>Colorimetria.....</i>	40
4.6.1.5	<i>Avaliação de viscosidade e densidade.....</i>	40
4.6.1.6	<i>Crioscopia.....</i>	40
<b>4.6.2</b>	<b><i>Caracterização físico-química das amostras de leite cru irradiadas e não irradiadas.....</i></b>	<b>40</b>
4.6.2.1	<i>Preparo das amostras por Liofilização .....</i>	40
4.6.2.2	<i>Espectroscopia de Infravermelho (FT-IR).....</i>	41
<b>4.7</b>	<b>Análise Estatística .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>Aparato Experimental Consolidado.....</b>	<b>42</b>
5.1.1	<i>Aspectos gerais do aparato experimental.....</i>	42
5.1.2	<b>Dose aplicada e transmitância dos materiais dos dutos.....</b>	<b>46</b>
5.1.2.1	<i>Regressão linear da irradiância UV-C em função do tempo .....</i>	46
5.1.2.2	<i>Transmitância dos materiais da tubulação e Impacto na dose UV-C efetiva.....</i>	48
<b>5.2</b>	<b>Seleção de tratamentos por UV-C em leite UHT inoculado com <i>E. coli</i>.....</b>	<b>50</b>
<b>5.3</b>	<b>Avaliação microbiológica das amostras de leite cru irradiadas.....</b>	<b>53</b>
5.3.1	<i>Contagem microbiana de mesófilos .....</i>	54
5.3.2	<i>Contagem de colônias típicas de <i>Staphylococcus aureus</i>.....</i>	55
5.3.3	<i>Contagem microbiana de enterobactérias.....</i>	56
5.3.4	<i>Contagem microbiana de <i>Escherichia coli</i>.....</i>	58
<b>5.4</b>	<b>Avaliação físico-química e hidrodinâmica do leite cru irradiado .....</b>	<b>60</b>
5.4.1	<i>Análise do regime de escoamento: Números de Reynolds e Dean.....</i>	60
5.4.2	<i>Parâmetros físico-químicos avaliados.....</i>	61
5.4.3	<i>Potencial hidrogeniônico (pH) e Viscosidade das amostras .....</i>	63
5.4.4	<i>Colorimetria das amostras.....</i>	64
<b>5.5</b>	<b>Espectroscopia de Infravermelho (FT-IR) .....</b>	<b>66</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização mundial da saúde (OMS), cerca de 10% da população mundial, aproximadamente 600 milhões de pessoas, anualmente, são acometidas por problemas de saúde oriundos da ingestão de alimentos e água contaminados por microrganismos patogênicos (DELORME, et al. 2020). Dentre os patógenos que contaminam o leite, destacam-se a *Escherichia coli*, *Salmonella spp*; *Staphylococcus aureus* e *Listeria monocytogenes* (GUAMÁN-LOZADA, et al. 2023).

A indústria de laticínios faz uso de tecnologias térmicas, em especial a pasteurização, para a redução ou eliminação dos microrganismos presentes no leite cru. Todavia, a aplicação do calor pode alterar as características sensoriais por meio da formação de compostos aromáticos indesejáveis, além de acarretar a precipitação do cálcio, a desnaturação proteica e a degradação das vitaminas. Por essa razão, estudos vêm sendo realizados para a redução e substituição das tecnologias térmicas, por outras que não causem danos ao alimento (ATIK; GUMUS 2021).

Dentre as tecnologias não térmicas que estão sendo testadas para redução dos microrganismos, pode-se ressaltar à radiação ultravioleta (UV) devido à redução de efeitos negativos ocasionados pelo calor e pela sua praticidade, permitindo a aplicação em uma ampla gama de produtos alimentícios (PIHEN et al., 2023), tais como laticínios (DELORME et al. 2020), sucos (VLADIMIR, et al. 2019), e produtos cárneos (PIHEN et al. 2023).

A tecnologia UV consiste na emissão de fótons a uma determinada frequência de onda, a qual varia de 100 nm a 400 nm, e vem sendo utilizada, dentre outras finalidades, na preservação de alimentos (SORO, et al. 2023). Conforme ressaltado por Atik e Gumus (2021), o comprimento de onda mais eficaz para a inativação microbiana é correspondente a faixa UV-C, que circunda os 254 nm. A radiação UV-C foi reconhecida no continente europeu como uma tecnologia efetiva e de caráter bactericida, além de ter se mostrado eficaz no aumento da vida útil do leite (WANG, et al. 2024). De acordo com Dasalkar, et al. (2024), um dos principais desafios na aplicação da radiação ultravioleta em alimentos líquidos é justamente a baixa penetração da luz em alimentos com alta absorbância, isto é, com densidade óptica maior que a da água, como o leite.

Outro fator que contribui para a eficiência do tratamento UV-C é o tipo de fluxo empregado. Em geral, fluidos submetidos a um fluxo de natureza turbulenta aumentam a superfície de contato dos fótons com os microrganismos presentes, afetando-os de forma mais eficiente sem que seja necessária a reaplicação do UV-C (WANG, et al. 2024a).

Em suma, por se tratar de uma tecnologia não térmica, a radiação UV-C oferece uma gama de vantagens como inativação eficiente de diversos tipos de microrganismos, perda mínima da qualidade nutricional, nenhum efeito tóxico conhecido ou resíduos do processo e um custo energético bem menor que a pasteurização, por não utilizar calor (HIRT et al. 2022). Tais vantagens se alinham com as necessidades da maioria dos produtores de leite do Brasil, em especial, do estado do Ceará, os quais encontram dificuldades de acompanhar a média nacional devido, dentre outros fatores, a baixa empregabilidade de tecnologias por parte dos pecuaristas e o alto custo de produção e beneficiamento do leite (OLIVEIRA et al. 2022).

De acordo com a Pesquisa Trimestral do leite do IBGE (2024), a produção de leite cru do Ceará, convertida em uma matéria-prima industrial, correspondeu a aproximadamente 110 mil litros, que equivale a menos de 2% do volume nacional referente ao período. Apesar da produtividade cearense, no que se refere ao leite, apresentar um caráter predominantemente crescente, cerca de 42% dos municípios do Ceará apresentam baixo índice de desenvolvimento rural (DE PAIVA; CAMPOS 2024), demonstrando a necessidade da região em aderir a novas tecnologias para melhoria das atividades relacionadas à agropecuária.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi projetar um aparato experimental que utiliza a radiação UV-C para redução da carga microbiana em alimentos, usando o leite como alimento modelo. Espera-se produzir um aparato que se adapte às características físicas do alimento a ser tratado, bem como a diferentes formas de aplicação, entre elas os sistemas em repouso e sob escoamento helicoidal, apresentando uma alternativa tecnológica de processamento para a conservação do leite aos produtores cearenses.

Este trabalho está vinculado às seguintes ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ODS 9 - Indústria, inovação e infraestrutura e ODS 12 - Consumo e produção responsáveis.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um aparato experimental que empregue radiação UV-C para redução da carga microbiana, usando leite como alimento modelo.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se as condições e parâmetros do aparato experimental com sistema de circulação helicoidal afetam a aplicação do UV-C no leite;
- Monitorar a interferência da temperatura durante o processamento de irradiação UV-C do leite;
- Avaliar como a transmitância do material dos dutos condutores do aparato experimental, a dosagem UV-C aplicada e o escoamento empregado no leite influenciam nas suas características microbiológicas e físico-químicas;
- Inocular o microrganismo *Escherichia coli* em leite estéril para identificar as condições de processo mais eficazes na redução da carga microbiana;
- Aplicar as condições de processo selecionadas e verificar como atuam na redução microbiana em leite cru oriundo da indústria de laticínios do Ceará (Brasil);
- Analisar se os tratamentos UV-C aplicados promovem alterações nas características físico-químicas do leite cru.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Aspectos gerais relacionados ao leite

O consumo de leite se iniciou, provavelmente, com o fim da última era glacial e o início da sedentarização das sociedades humanas. Impactos positivos no desenvolvimento dessas sociedades estão diretamente relacionados a este novo padrão de consumo, de forma que tal padrão se popularizou com o decorrer do tempo até atingir, no final da última década, a marca 715.922 milhões de toneladas produzidas em todo o mundo (OLIVEIRA et al., 2022; Associação Brasileira de Leite Longa Vida, 2018).

O leite consiste no produto oriundo da ordenha ininterrupta de vacas sadias, bem alimentadas e descansadas, atendendo às normas sanitárias de higiene (BRASIL, 2011). A obtenção do leite deve atender às boas práticas agropecuárias, que por sua vez consistem em uma série de práticas, procedimentos e ações implementadas na propriedade rural visando garantir a produção de leite de forma segura para o consumidor, incluindo a organização da propriedade, a manutenção das instalações e equipamentos, e a formação e capacitação dos responsáveis pelas tarefas diárias (BRASIL, 2018b).

Do ponto de vista nutricional, em uma dieta padrão diária, o leite representa 5% da demanda energética de um indivíduo, bem como, 10% de proteína e 9% de lipídios (DIAS, 2023). O leite apresenta em sua composição 56 nutrientes como carboidratos (em especial a lactose), proteínas (sendo as principais a caseína e as proteínas de soro) e gordura, além de 57 minerais (DASALKAR et al., 2024; MANNERS; CRAVEN, 2003).

Além do leite destacar-se pelo seu alto teor nutritivo, este alimento também apresenta alta perecibilidade devido a certas características intrínsecas como alta atividade de água e pH próximo à neutralidade, entre 6,6 a 6,8, tornando-o propenso ao desenvolvimento microbiano (DASALKAR et al., 2024).

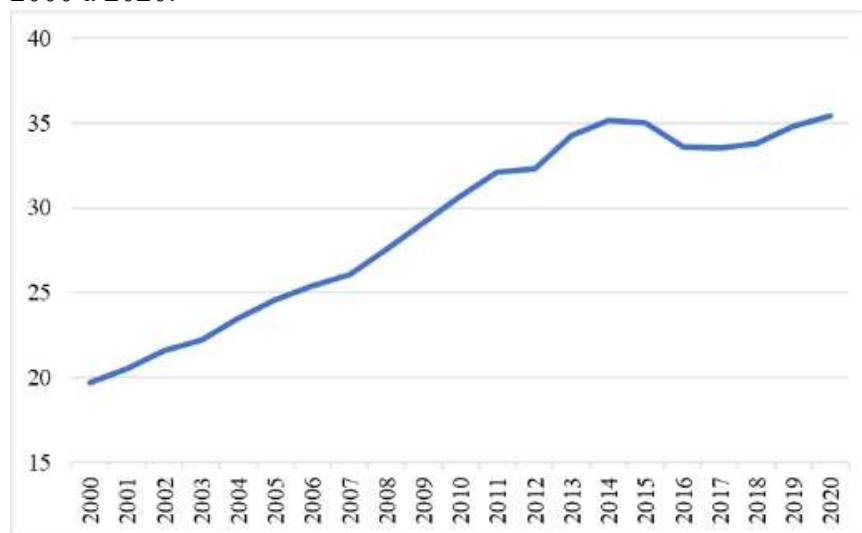
##### ***3.1.1 Produção leiteira e indústria de laticínios do Brasil***

A criação de gado brasileira detém grande destaque por ser uma das principais atividades econômicas do país desde o século XVI, sendo um dos fatores mais importantes no desbravamento territorial do país (NETO; MARQUESAN, 2020). Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor de leite do mundo, sendo a pecuária leiteira uma das principais atividades econômicas do país. Estima-se, que existem cerca de 1,1 milhão de zonas produtoras

de leite, de forma que a atividade está presente em quase todos os municípios, gerando emprego e renda para os trabalhadores da zona rural (LANA; BERNARDO; VASCONCELOS, 2024; EMBRAPA, 2019; CARVALHO; CARVALHO, 2023).

O leite representou, no ano de 2023, um apuramento bruto de aproximadamente 62 bilhões de reais, ocupando a terceira posição dentre os produtos pecuários de maior potencial financeiro para o ano em questão (MAPA, 2023). É possível observar um aumento majoritariamente progressivo na produção de leite entre os anos de 2000 e 2020 (Figura 1). Gonçalves, Montebello e Santos (2023) apontam que tal aumento se deve a fatores como o emprego de tecnologia na produção, legislação específica e estrutura de mercado.

Figura 1 – Produção de leite do Brasil (em bilhões de litros) de 2000 a 2020.



Fonte: GONÇALVES; MONTEBELLO; SANTOS, 2023. IBGE 2020.

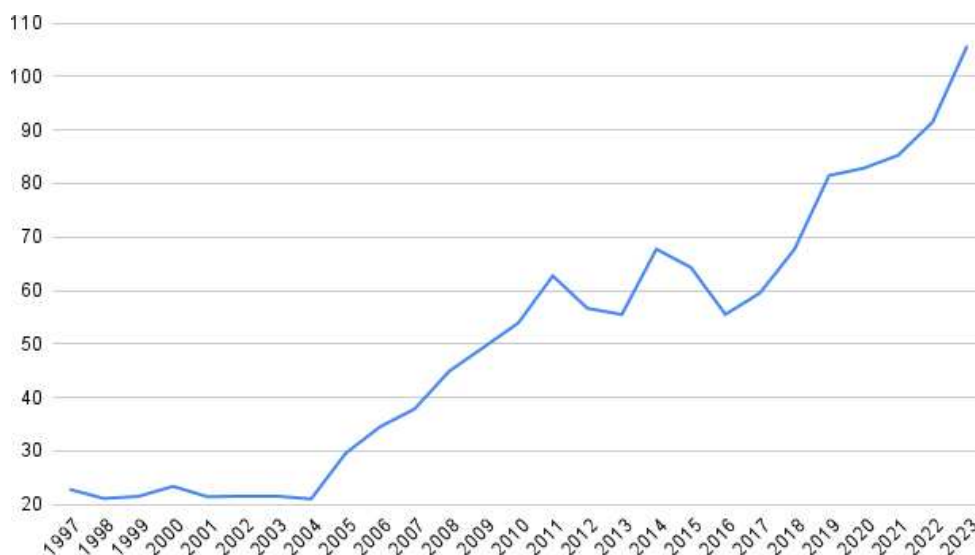
No entanto, a margem de lucro gerada para os produtores é baixa devido ao alto custo de produção. Além do custo com o transporte e o armazenamento, um dos principais fatores que impacta na qualidade, e por consequência na produtividade industrial do leite no Brasil, diz respeito à contagem total bacteriana (CBT) e contagem de células somáticas (CCS). No geral, tais contagens costumam exceder os limites estabelecidos na legislação vigente ( $\leq 300.000$  UFC/mL para CBT e  $\leq 500.000$  UFC/mL para CCS) pois o pequeno produtor não exerce controle pleno dos parâmetros do processo, a exemplo do armazenamento do leite resfriado que pode tanto ocorrer em equipamentos com higienização inadequada, com funcionamento pouco eficiente, como também ocorrer por tempo prolongado, contribuindo para o aumento da carga microbiana da matéria-prima (BRASIL, 2018; BRASIL, 2020; CARVALHO; CARVALHO, 2023).

### 3.1.2 Produção leiteira e indústria de laticínios do estado do Ceará

O estado do Ceará, localizado no Nordeste do Brasil, enfrenta diversas dificuldades na manutenção e progressão das atividades agropecuárias. Tais dificuldades são oriundas de questões sociais, relacionadas aos níveis de pobreza, e por questões ambientais relacionadas ao clima semi-árido que se faz presente em quase todo o território (PAIVA; LEMOS; CAMPOS, 2021).

A quantidade de leite produzido no estado do Ceará no ano de 2023 (Figura 2) foi a maior da série histórica analisada. A produção de gado leiteiro consiste em uma das maiores e mais importantes atividades agropecuárias praticadas no semiárido brasileiro, por questões de natureza cultural e pela ampla variedade de produtos que podem advir de tais práticas. Um exemplo disso, é o destaque para o município de Quixeramobim, devido ao aumento da atividade leiteira e de seus derivados, a qual tem trazido maior oferta de emprego e renda para a população (SILVA; GÓES; CONRADO, 2023).

Figura 2 – Média anual de leite cru (m<sup>3</sup>), resfriado ou não, industrializado no estado do Ceará no intervalo histórico de 1997 a 2023



Fonte: IBGE - Pesquisa Trimestral do Leite (2024)

Por ser dependente de variáveis climáticas, a bovinocultura de leite, tal qual as demais atividades de natureza agrícola da região, se encontra em um cenário de vulnerabilidade e necessidade de maiores investimentos tecnológicos, pois a maior parte das atividades relacionadas a produção de leite nessas localidades são praticadas familiarmente e com baixa tecnologia (LEMOS et al., 2022). No entanto, indo de encontro a esta necessidade, conforme

apontam Lemos et al. (2022) a maior parte das atividades relacionadas a produção de leite nessas localidades são praticadas familiarmente e com baixo contato tecnológico. Mesmo assim, os produtores agropecuários, e em especial os produtores de leite, vêm demonstrando maior interesse na busca por soluções que culminem em maior retorno financeiro (PAIVA; LEMOS; CAMPOS, 2021).

Nesse sentido, identifica-se um cenário de possibilidades na divulgação e no desenvolvimento de novas tecnologias que tornem a produção de leite menos onerosa e que aumentem a qualidade do produto, possibilitando o maior retorno financeiro.

### **3.2 Segurança microbiológica e Tratamento térmico do leite**

Estima-se que 10% da população mundial passa por complicações de saúde devido à ingestão de alimentos contaminados, das quais 420.000 pessoas acabam vindo a óbito anualmente (DELORME et al., 2020). Além de ser um alimento com elevado grau nutricional, o leite apresenta características intrínsecas que o tornam mais suscetível à ação bacteriana, como elevada atividade de água e pH próximo à neutralidade. Esse conjunto de fatores faz com que seja necessário o emprego de tecnologias que reduzam a sua perecibilidade (DASALKAR et al., 2024; MANNERS; CRAVEN, 2003). Para a indústria de laticínios, é fundamental dar atenção extra ao uso de tecnologias como pasteurização, esterilização e refrigeração, além das boas práticas de fabricação durante o processamento. Isso se faz necessário não apenas em razão da perecibilidade do leite, mas também porque, ao longo das etapas de beneficiamento dos produtos, há uma ampla variedade de condições favoráveis à contaminação, como variações de temperatura, o intervalo entre a ordenha e o processamento, as condições de armazenamento e a manipulação da matéria-prima (DELORME et al., 2020).

*Escherichia coli* (*E. coli*) é uma das principais bactérias responsáveis pela contaminação do leite, sendo amplamente utilizada como um indicador confiável de contaminação fecal direta ou indireta e da possível presença de patógenos entéricos em leite cru e em produtos lácteos não pasteurizados.

Uma das formas mais tradicionais para conservação de um alimento consiste em submetê-lo ao aquecimento, a uma certa temperatura e tempo pré-determinados, visando a eliminação de patógenos, redução de deteriorantes e aumento da vida útil do alimento (ROCHA et al. 2022). Contudo, o emprego do calor para combate microbiológico deve ser realizado considerando diversos fatores como as propriedades físico-químicas do alimento, bem como fatores ambientais. Tais considerações devem ser tomadas mediante testes preliminares que

simulam a resistência dos microrganismos ao calor, e com isso, são elaboradas as curvas de inativação, utilizadas pela indústria para a elaboração e manutenção dos tratamentos térmicos (WANG et al.; 2024b). Vale ressaltar, conforme mostrado por Wang et al. (2024b) que tais curvas podem não refletir com precisão as condições reais. Fatores como o comportamento cinético das células vegetativas, têm potencial de gerar distorções que não são detectadas ou avaliadas pelos testes.

No caso do leite, a pasteurização lenta (62 a 65°C por 30 minutos), a pasteurização rápida (por volta de 72°C por 15 segundos) e tratamento UHT (130 a 150°C por um período de 2 a 5 segundos) são os principais tratamentos térmicos empregados (DASALKAR et al., 2024; MANNERS; CRAVEN, 2003). No entanto, tanto Dasalkar, et al (2024) quanto Rocha, et al. (2022) apontam que tais técnicas geram efeitos adversos de natureza sensorial, nutricional e físico-química nos produtos e por essa razão, a indústria de alimentos tem buscado alternativas que reduzem tais impactos negativos. A desnaturação da proteína do soro e a reação de Maillard são exemplos desses efeitos indesejados, os quais se intensificam conforme o aumento da temperatura. Neste sentido, o leite pasteurizado oferece mais vantagens em relação ao UHT, que por sua vez, oferece um prazo de validade maior e pode ser armazenado em temperatura ambiente (XIE et al. 2024). Entretanto, é relevante salientar que essas etapas representam entre 17% e 26% do consumo total de energia nas operações de laticínios, uma vez que os processos de aquecimento e resfriamento estão entre as atividades mais onerosas e com maior demanda energética (AYOU; CORONAS, 2024; PRANAVI; KS et al., 2025).

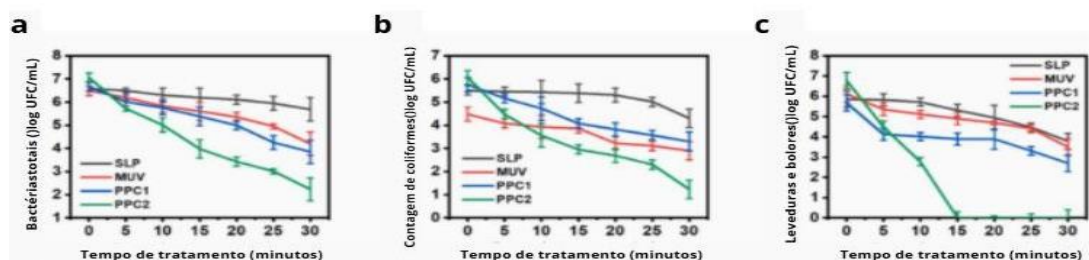
### **3.3 Utilização de tecnologias não térmicas para o tratamento do leite**

Tecnologias como a aplicação de alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado e irradiação ultravioleta representam algumas das tecnologias não térmicas de maior potencial, pois vêm mostrando eficácia proporcional aos tratamentos térmicos tradicionais (CERIBELI et al. 2023). As tecnologias de natureza não-térmica eficientes visam o aumento da vida útil, a eliminação/redução da contaminação microbiológica e o mínimo de impactos nutricionais e sensoriais aos alimentos (DESHWAL; TIWARI; KADYAN, 2021).

O mercado de tecnologias não térmicas voltadas para a indústria de alimentos, no ano de 2020, representou em âmbito global um montante de 1,3 bilhões de dólares, com expectativa de 3,9 bilhões para o ano de 2026. O fator mais relevante para o sucesso destas tecnologias, do ponto de vista mercadológico, é a sua aplicabilidade em um contexto industrial em larga escala (ALSAEDI et al. 2024).

A figura 3 ilustra a ação comparativa de diferentes técnicas para a eliminação de patógenos do leite. É possível notar, de acordo com Wang et al. (2024a) que tratamentos não térmicos são tão ou mais eficientes que a pasteurização tradicional. Tal apontamento se alinha diretamente com Rocha et al. (2022), o qual expõe que tecnologias não térmicas apresentam vantagens não só por serem capazes de manter altas concentrações de compostos bioativos, como também por aumentar a concentração de compostos voláteis, devido à geração de compostos antioxidantes, antidiabéticos e anti-hipertensivos.

Figura 3 – Comparação de diferentes métodos para a redução de (a) bactérias totais (b) coliformes e (c) leveduras e fungos em amostras de leite



Fonte: WANG et al. 2024a. SLP - Pasteurização / MUV = Irradiação UV-C / PPC1 - Irradiação UV-C + Ultrassom de baixa potência / PPC2 - Irradiação UV-C + Ultrassom de alta potência.

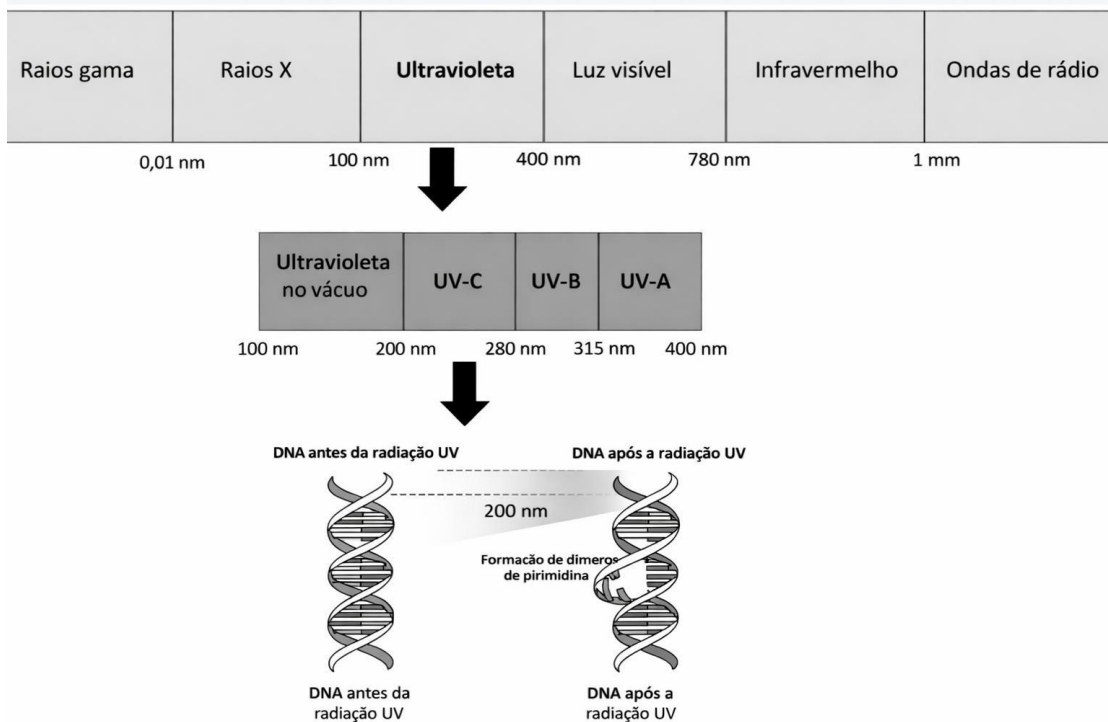
A aceitabilidade, preferência e escolha do consumidor por determinados tipos de produtos são cruciais para os investimentos da indústria na melhoria de seus processos produtivos. Alimentos processados com tecnologias não térmicas, como a irradiação ultravioleta, foram considerados mais seguros e mais duráveis por quase a totalidade dos entrevistados em um trabalho de percepção do consumidor na América do Norte e Europa (DELORME et al., 2020). Isto demonstra mais uma vantagem das tecnologias não térmicas, pois estas são capazes de melhorar características como cor, sabor, aroma e textura, comparados não só a alimentos tratados termicamente como a alimentos que não recebem nenhum tipo de beneficiamento (ROCHA et al., 2022).

Em linhas gerais, pode-se dizer que as tecnologias não térmicas não afetam significativamente os parâmetros físico-químicos do leite cru, apresentam o potencial de gerar produtos de maior qualidade em comparação aos tratados termicamente, mas não estão livres da possibilidade de acarretarem efeitos indesejados, como oxidação lipídica e desnaturação de proteínas bioativas, dependendo do tratamento, das condições empregadas (CHEN et al., 2024).

### 3.4 O efeito e a utilização da luz UV-C para tratamento de leite

No final da última década, a energia UV-C devido a sua ação bactericida, foi considerada eficiente no aumento da vida útil do leite pela Comissão Europeia de Produtos Dietéticos e Alergias (WANG et al., 2024a; EFSA, 2016). O emprego da irradiação UV-C na preservação do leite cru, quando realizada corretamente, pode não só ser uma forma de substituição do tratamento térmico, como também gerar benefícios a mais no combate aos microrganismos. A irradiação UV-C tem o poder de afetar bactérias e esporos (Figura 4) que não são eliminados pelo processo de pasteurização, além de contribuir no aumento do tempo de vida útil durante o armazenamento, podendo agir contra as bactérias psicotróficas que se fazem mais presentes durante tal intervalo de tempo (ATIK; GUMUS, 2021).

Figura 4 – Mecanismo de ação da irradiação UV-C na inativação microbiana



Fonte: DELORME et al. (2020).

A eficiência do tratamento UV em alimentos depende diretamente de uma série de fatores como as propriedades bioquímicas do alimento, quantidade de sólidos em suspensão presentes em alguns alimentos líquidos, características ópticas do meio tratado e do número de fótons que conseguem atingir diretamente o alimento, e conseqüentemente, o cromossomo das bactérias (PIHEN et al., 2023).

Dentro da indústria de alimentos, a radiação ultravioleta foi utilizada inicialmente para a desinfecção de água. Posteriormente, passou a ser utilizada em outros tipos de líquidos como soluções açucaradas, na indústria de sucos e, finalmente, no tratamento do leite cru e seus derivados (VLADIMIR, et al., 2019). A UV age nos ácidos nucleicos das células bacterianas, afetando a citocina do RNA e os dímeros de timina, referentes ao DNA, impedindo assim a replicação (HIRT et al., 2022).

A depender da dose aplicada, a UV-C também pode afetar outros tipos de microrganismos como fungos e vírus, agindo como agente indutor de mutações de caráter letal em seus respectivos genomas (ATIK; GUMUS 2021), além da geração de radicais livres e peróxidos com propriedades mutagênicas (VLADIMIR et al., 2019).

Em geral, não há diferença significativa em relação aos impactos nos macronutrientes do leite (proteínas, lipídios e carboidratos) submetido tanto ao tratamento térmico convencional quanto a irradiação UV-C. No entanto, estudos apontam que amostras de leite expostas a doses de 5 a 102 mJ/cm<sup>2</sup>, no comprimento de onda de 254 nm, provocam aumento no teor da vitamina D3, e nenhuma redução de outros compostos como a vitamina B2 e a vitamina B12 reduzidas na ordem dos 31% e 12%, respectivamente, quando o leite é tratado termicamente (PEGU; ARYA. 2023; FERREIRA et al., 2025). Além disso, o uso da tecnologia em questão, pode provocar alterações na  $\beta$ -lactoglobulina, que é uma proteína envolvida no efeito alergênico no leite. Tais modificações podem fazer com que o potencial alergênico seja reduzido, tornando o produto mais seguro para os consumidores que apresentam restrição aos efeitos desta proteína, revelando uma boa linha de investigação científica para elucidar os efeitos benéficos paralelos que o uso do UV-C no leite pode provocar (VLADIMIR et al., 2019).

### **3.5 Equipamentos emissores de luz UV-C para tratamento de leite**

Os dispositivos desenvolvidos para a aplicação do UV-C em alimentos líquidos são denominados reatores (DELORME et al., 2020). Reatores de vórtice Dean, de fluxo turbulento, de fluxo laminar e de Taylor- Couette são alguns dos principais exemplos referentes aos equipamentos emissores de luz UV-C, voltados, em especial, para alimentos líquidos de alta absorvância (HIRT et al., 2022).

Alguns dos reatores UV-C desenvolvidos na literatura (Tabela 1) apresentam diferentes abordagens tecnológicas para o tratamento de alimentos fluidos, com variação no tipo de incidência (contínua ou pulsada) e na potência aplicada (PA), que varia de 15 W a 165

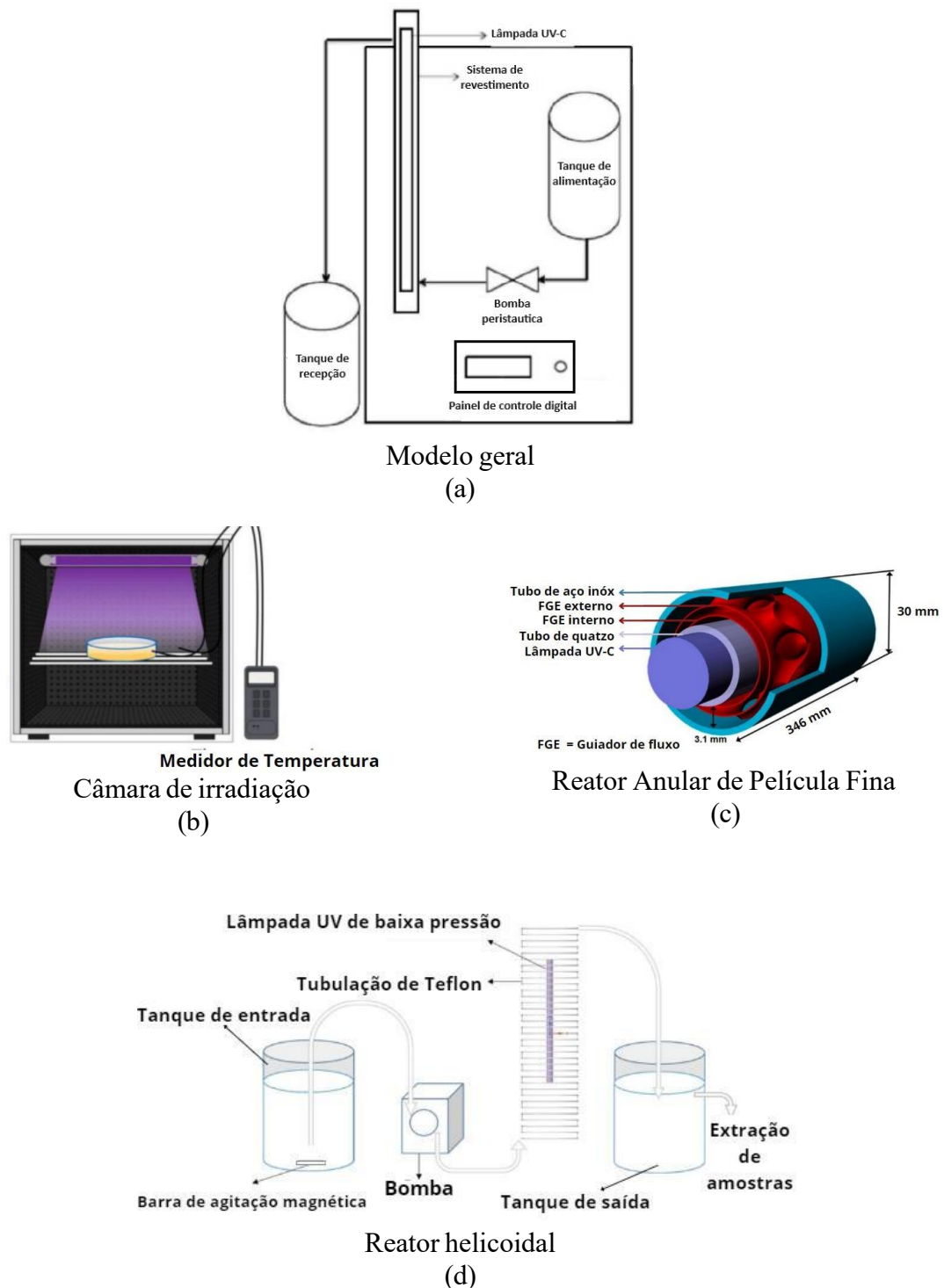
W. A predominância do fluxo contínuo sugere uma busca por processos mais estáveis e consistentes na aplicação prática.

**Tabela 1 – Classificação de reatores UV-C para alimentos fluidos com base na literatura.**

<b>Tipo de Reator</b>	<b>CA</b>	<b>I</b>	<b>PA</b>	<b>PUV-C</b>	<b>Referência</b>
Reator helicoidal	Fluxo	Contínua	26,0 W	8,7 W	GAUTAM et al., 2017
Reator Anular de Película Fina	Fluxo	Contínua	165,0 W	56,1 W	VLADIMIR et al. 2019.
Reator UV-C de fluxo contínuo com resfriamento e recirculação peristáltica	Fluxo	Contínua	80,0 W	18,0 W	ATIK; GUMUS, 2021
Reator Anular de Película Fina UV-C (TFR) com Elementos Guiadores de Fluido (FGE)	Fluxo	Contínua	20,0 W	6,0W	GÖK et al., 2021
Reator Anular de Película Fina UV-C (TFR) com Elementos Guiadores de Fluido (FGE)	Fluxo	Contínua	20,0 W	7,5 W	HIRT et al., 2022
Reator helicoidal	Fluxo	Contínua	15,0 W	*NI	PENDYALA et al., 2022
Câmara de irradiação	Repouso	Contínua e pulsada	15W	4,9W	PIHEN et al., 2023
Reator helicoidal	Fluxo	Pulsada	87 W	27W	CHEN et al., 2024

Fonte: Autor (2025). CA - Condição da amostra irradiada; I - Forma de incidência da luz; PA - Potência total da lâmpada utilizada; PUV-C - Potência da lâmpada utilizada na frequência UV-C (254nm). \*NI - Não informado.

Figura 5 – Esquema integrado de reatores UV-C para tratamento de fluidos alimentícios, incluindo modelo geral, arranjos estacionário, encamisado e helicoidal.



Fonte: (a) ATIK; GUMUS, 2021 (adaptada); (b) PIHEN et al., 2023; (c) GÖK et al., 2021; (d) PENDYALA et al., 2022.

Observa-se também que a potência do UV-C (PUV-C), ou seja, a fração de radiação efetivamente utilizada no processo, corresponde aproximadamente a 1/3 da potência total aplicada (PA) na maioria dos casos. Isso aponta para uma eficiência média das lâmpadas UV-C na conversão de energia elétrica em radiação germicida, um aspecto relevante para a

avaliação de custos operacionais e eficiência energética. No entanto, há situações em que essa proporção se distancia da média, sugerindo possíveis variações na qualidade da lâmpada, na geometria do reator ou nas condições específicas de aplicação. Também se nota a ausência de informações completas em alguns casos, o que pode dificultar comparações precisas entre os diferentes modelos.

O modelo básico de um reator UV-C (Figura 5) é composto por um tanque contendo o fluido a ser tratado, com uma bomba responsável por movimentá-lo até a área de irradiação. Após ser exposto à radiação UV-C, o fluido é conduzido para outro tanque, podendo ser recirculado ou não de volta ao sistema.

Ao projetar um reator UV-C para o tratamento de leite, é crucial levar em conta as características intrínsecas do fluido, como sua turbidez e a espessura da película de leite. Como o leite é um fluido opaco, ele apresenta maior resistência à penetração dos raios UV-C, o que exige um controle preciso da espessura da camada irradiada para garantir a eficácia do tratamento (Guamán-Lozada et al., 2023).

Um modelo de reator eficaz para lidar com fluidos opacos como o leite é o reator de película fina, que reduz a profundidade do fluido, aumentando a superfície de contato com a radiação UV-C. No entanto, esse modelo não é recomendado para líquidos com partículas em suspensão, como o leite, pois pode dificultar a limpeza do sistema e comprometer a uniformidade da ação da luz UV-C (Gök et al., 2021).

Além disso, um desafio crítico no tratamento de leite com UV-C é a atenuação da irradiação, que pode reduzir a eficiência da radiação em até 90% se estratégias adequadas não forem aplicadas. Para mitigar esse efeito, são frequentemente utilizadas técnicas como escoamento em fina lâmina, fluxos secundários, recirculação e mecanismos de vórtices azimutais, que aumentam a superfície de contato do fluido com a radiação UV-C, melhorando a eficiência do processo e tornando o tratamento mais eficaz (Simmons et al., 2012).

Dentre os modelos apresentados, o reator helicoidal UV-C é amplamente reconhecido por sua alta eficiência no tratamento de microrganismos em fluxos de alimentos líquidos, destacando-se como uma das configurações mais eficazes para desinfecção, especialmente em líquidos opacos, como o leite. De acordo com Moghaddam e Ghomshahi (2024), os reatores helicoidais exploram o efeito de Dean, que otimiza a mistura do fluido e promove uma distribuição mais homogênea da radiação UV-C, resultando em uma melhor eficiência na inativação microbiana. Esse fenômeno está associado ao surgimento de um escoamento secundário transversal, que dá origem a movimentos circulares opostos na seção do tubo, conhecidos como vórtices de Dean.

Uma das principais vantagens do reator helicoidal é a melhoria da homogeneidade da dose de radiação UV-C, a qual é intensificada com o aumento do número de Dean e do grau de turbulência no escoamento do fluido. A intensidade desse efeito é expressa pelo número de Dean (De), um parâmetro adimensional que relaciona as forças inerciais do escoamento com a curvatura do tubo, sendo função do número de Reynolds e da geometria do sistema. Isso não só aumenta a eficácia do tratamento, mas também permite a utilização do reator para líquidos de diferentes características, como sucos de frutas e leite, que possuem diferentes níveis de transparência e turbidez (MANDAL; PRATAP-SINGH, 2021; KOUTCHMA et al., 2007). Além disso, o design helicoidal favorece a formação de vórtices que geram mistura radial, aumentando ainda mais o contato do fluido com a radiação UV-C e melhorando a eficiência do processo.

Outro benefício importante é a capacidade do reator helicoidal de tratar líquidos não newtonianos, como o leite, sem comprometer a qualidade do produto, mesmo com a presença de partículas em suspensão, uma característica desafiadora em outras configurações de reatores (MOGHADDAM; GHOMSHAHI, 2024). Com base em estudos experimentais e simulações numéricas, a configuração helicoidal tem se mostrado superior em termos de desempenho hidrodinâmico e eficiência de desinfecção, consolidando-se como uma solução promissora para a pasteurização não térmica de alimentos líquidos.

### **3.6 Parâmetros envolvidos nos tratamentos UV-C de fluidos alimentícios**

Os tratamentos UV-C de fluidos alimentícios envolvem vários parâmetros críticos que impactam diretamente a eficácia do processo, sendo amplamente discutidos em estudos científicos (Tabela 2). A dose de radiação (D), a vazão volumétrica (Q), a distância entre a lâmpada e a amostra (DA) e a espessura do fluido irradiado (EI) são alguns dos fatores que variam conforme os objetivos e condições de cada pesquisa.

Esses parâmetros devem ser controlados e monitorados para garantir que o tratamento UV-C seja eficaz e seguro, preservando tanto a qualidade quanto a segurança dos alimentos. Além disso, variações nas condições experimentais e nas propriedades dos fluidos, como espessura e turbidez, influenciam a penetração da radiação UV-C, exigindo ajustes específicos para otimizar o processo em diferentes contextos.

Tabela 2 – Parâmetros de tratamento UV-C em fluidos lácteos citados na literatura científica.

Fluido	D	Q (m <sup>3</sup> /s)	D <sub>A</sub> (m)	E <sub>I</sub> (m)	REFERÊNCIA
Leite cru	3,6.10 <sup>5</sup> (J/m <sup>2</sup> )	5,00.10 <sup>5</sup>	2,00.10 <sup>-3</sup>	*NI	WANG et al. 2024a
Leite inoculado	5,96 a 14,69.10 <sup>5</sup> (J/m <sup>3</sup> )	8,33.10 <sup>-6</sup>	*NI	6,0.10 <sup>-3</sup>	GÖK et al., 2021
	2,10 a 14,63.10 <sup>5</sup> (J/m <sup>3</sup> )	2,77.10 <sup>-5</sup>		3,1.10 <sup>-3</sup>	
Leite cru	1,302 (mJ/m <sup>2</sup> )	60 s (Estacionário)	*NI	2,00.10 <sup>-3</sup>	GUAMÁN-LOZADA et al., 2023
	33,8 (kJ/m <sup>2</sup> )	480 s (Estacionário)		4,00.10 <sup>-3</sup>	
	64,1 (kJ/m <sup>2</sup> )	900 s (Estacionário)		6,00.10 <sup>-3</sup>	
Leite cru e Leite UHT inoculado	6,00 a 21,90.10 <sup>7</sup> (J/m <sup>3</sup> )	8,33.10 <sup>-8</sup> a 3,00.10 <sup>-7</sup>	*NI	*NI	ATIK; GUMUS, 2021
Leite de cabra inoculado	1,3.10 <sup>8</sup> a 1.10 <sup>9</sup> (J/m <sup>2</sup> )	1 a 8 s (Estacionário)	3,0 a 5,0 10 <sup>-3</sup>	*NI	KASAHARA; AGUILAR, 2015

Fonte: Autor (2025). D - Dose UV-C irradiada ao fluido / Q - Vazão volumétrica aplicada ao fluido no sistema / D<sub>A</sub> - Distância entre a lâmpada e a amostra / E<sub>I</sub> - Espessura do fluido irradiado. \*NI - Não informado.

Analisando os dados da literatura sobre as doses de radiação aplicadas, observa-se que elas variam consideravelmente. Para o leite cru, por exemplo, as doses de UV-C podem variar de 1,302 mJ/m<sup>2</sup> a 3,6 \* 10<sup>5</sup> J/m<sup>2</sup>, enquanto para leite inoculado, os valores podem ser ainda maiores, entre 5,96 \* 10<sup>5</sup> J/m<sup>3</sup> e 14,69 \* 10<sup>5</sup> J/m<sup>3</sup>, dependendo das condições experimentais e dos objetivos do tratamento. Essas variações são reflexo da necessidade de adaptar a dose de UV-C para a redução microbiana, considerando a espécie do microrganismo

presente e as características do fluido. Além disso, é importante notar que a dose necessária também pode ser influenciada pela taxa de irradiância do reator, ou seja, pela quantidade de energia UV-C que realmente atinge o alimento, um fator crucial para a eficácia do processo (SIMMONS et al., 2012).

A espessura do fluido irradiado (EI) também é um parâmetro importante, pois impacta diretamente na penetração da radiação UV-C. Fluidos mais espessos ou com maior turbidez apresentam maiores desafios para a penetração da radiação, o que pode justificar a aplicação de doses mais altas de UV-C em alguns casos. Os valores de espessura variam entre  $2,00 * 10^{-3}$  m e  $6,00 * 10^{-3}$  m nos estudos revisados, e a espessura do fluido deve ser considerada ao projetar o reator para garantir que toda a amostra seja efetivamente irradiada (GUAMÁN-LOZADA et al., 2023).

Simmons et al. (2012) explora a eficácia da radiação UV-C na preservação de alimentos líquidos, especialmente aqueles com alta turbidez, como sucos, leite e ovos líquidos. A pesquisa destaca que a eficácia da desinfecção por UV-C está diretamente relacionada à vazão do fluido no reator. Em fluidos altamente turvos, a atenuação da radiação UV é significativa, o que limita sua penetração e, conseqüentemente, sua capacidade de inativar microrganismos. Para contornar esse desafio, os autores propõem o uso de reatores com design inovador, como o turbulator™ UV-C, que combina características de filmes finos e mecanismos de renovação de superfície por meio de fluxos secundários, como vórtices de Dean. Esses designs promovem uma mistura mais eficaz do fluido, garantindo que todas as partes recebam a dose adequada de radiação UV, independentemente da vazão.

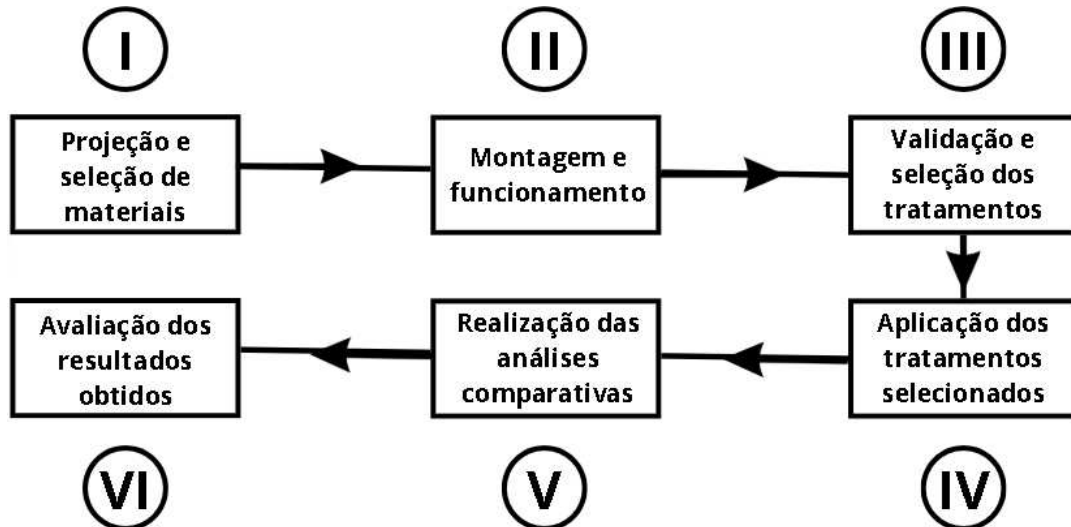
Além disso, estudos complementares reforçam a importância da vazão no processo de desinfecção por UV-C. Por exemplo, Gunter-Ward et al. (2018) demonstraram que a aplicação de UV-C em leite desnatado pode inativar eficazmente patógenos alimentares, desde que a dose de radiação seja adequada ao tempo de exposição, que por sua vez é influenciado pela vazão do fluido no sistema. Da mesma forma, Müller et al. (2011) investigaram o uso de tecnologia de vórtice de Dean em sucos de frutas, observando que a combinação de design de reator e controle de vazão é crucial para alcançar a inativação microbiana desejada.

Em resumo, a eficácia da desinfecção por UV-C em alimentos líquidos turvos está intrinsecamente ligada à vazão do fluido no sistema. Designs de reatores que promovem uma mistura eficaz e garantem uma exposição uniforme à radiação UV são essenciais para maximizar a redução microbiana. O controle preciso da vazão, aliado a designs inovadores de reatores, pode superar as limitações impostas pela turbidez dos alimentos, permitindo uma desinfecção eficaz e segura.

## 4 METODOLOGIA

O desenvolvimento do aparato experimental seguiu uma série de etapas (Figura 6) com o intuito de tornar o procedimento mais dinâmico.

Figura 6 – Fluxograma de etapas metodológicas para o desenvolvimento, utilização e consolidação do aparato experimental de radiação UV-C em leite



Fonte: Autor (2025).

A primeira etapa consistiu na concepção do aparato experimental, fundamentado em equipamentos semelhantes descritos na literatura e nos materiais disponíveis para a montagem. A etapa seguinte envolveu a montagem e a operação do sistema, com ênfase na definição dos principais parâmetros. Posteriormente, os tratamentos foram validados para garantir a aplicação definitiva. Assim, foram realizadas as análises comparativas entre as amostras irradiadas e não irradiadas, seguidas pela discussão dos resultados.

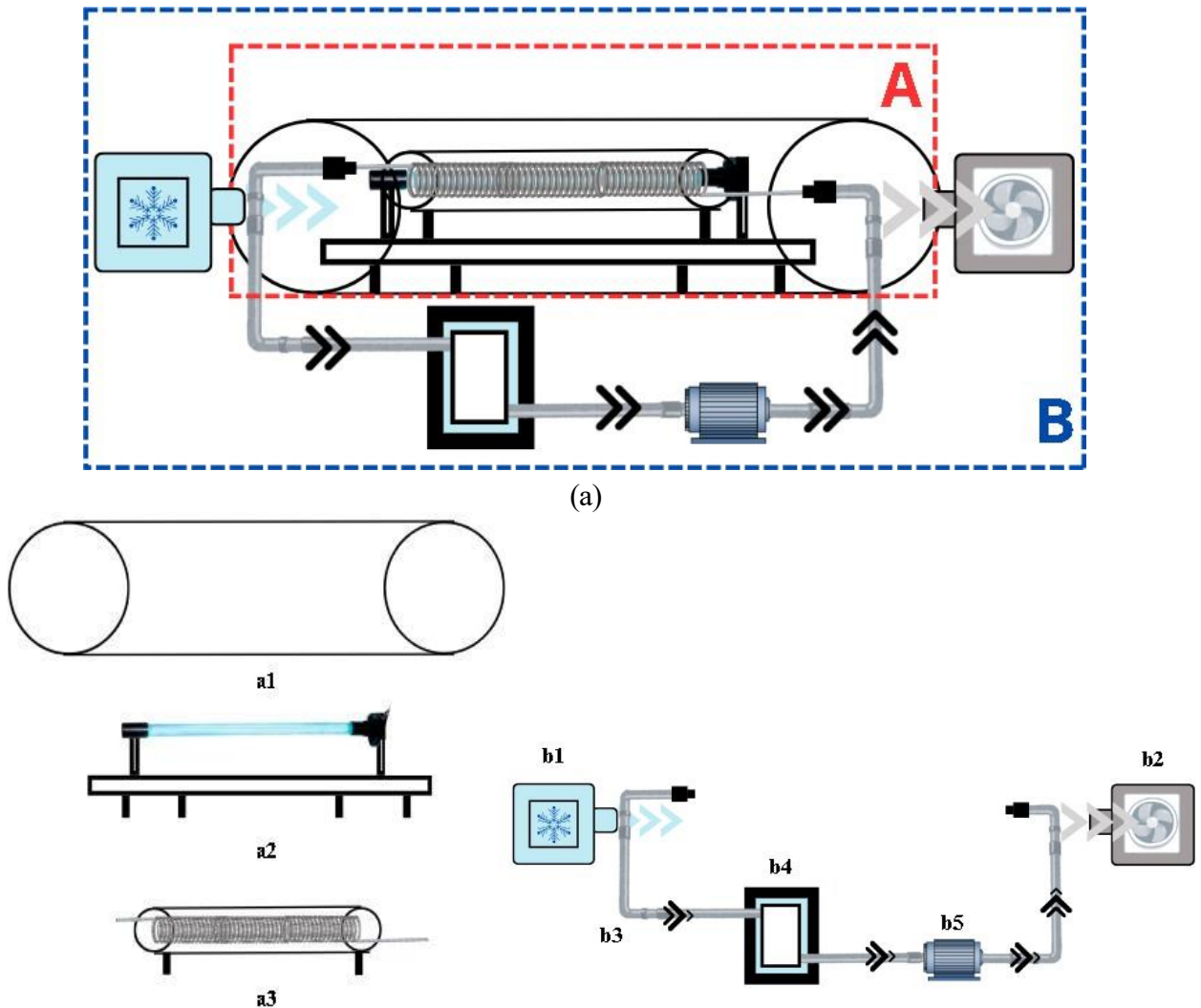
### 4.1 Projeção e seleção de materiais para o desenvolvimento do aparato experimental

#### 4.1.1 Modelo proposto

O aparato experimental desenvolvido neste estudo foi projetado com a proposta de ser um sistema versátil e customizável, capaz de ser adaptado a diferentes tipos de amostras alimentícias. Essa característica amplia o quadro de potenciais aplicações na indústria de alimentos, permitindo sua adequação a distintas propriedades físico-químicas e comportamentos reológicos. No entanto, considerando que o foco consiste no tratamento de

amostras de leite cru em fluxo contínuo, a descrição apresentada a seguir corresponde à configuração empregada especificamente para essa matriz.

Figura 7 – Esquema ilustrativo do aparato experimental e seus componentes para radiação UV-C em leite.



Fonte: O autor.

A – Seção de aplicação de UV-C, B – Circuito externo, a1 – Câmara de isolamento da seção de aplicação de UV-C, a2 – Lâmpada UV-C, a3 – Cilindro de sustentação do duto helicoidal para condução do leite na seção irradiada, b1 – Sistema de refrigeração, b2 – Sistema de exaustão, b3 – Duto de PVC para condução do leite no circuito externo, b4 – Câmara encamisada de resfriamento e b5 – Bomba diafragma para circulação do fluido no sistema.

O projeto do sistema baseou-se em referências de reatores helicoidais descritos na literatura por Feng et al. (2013), Gautan et al. (2017) e Pendyala et al. (2022), cujos estudos demonstraram elevada eficiência no tratamento de líquidos por radiação UV-C. Tais reatores têm como vantagem principal a capacidade de promover maior uniformidade na distribuição da dose de radiação ao longo do fluido.

O aparato (Figura 7) consiste em uma lâmpada UV-C posicionada axialmente, envolvida por um duto helicoidal transparente, por onde o leite é conduzido. O sistema inclui ainda elementos complementares como reservatório, bomba peristáltica, válvulas reguladoras e sensores, compondo um circuito fechado que permite o controle preciso das condições operacionais durante o processo de irradiação. O aparato experimental desenvolvido foi composto por duas partes principais: a seção de aplicação de UV-C (A) e o circuito externo (B).

Na seção de UV-C (A), o leite é conduzido por um duto helicoidal (a3), que contorna uma lâmpada UV-C (a2). A lâmpada emite raios de luz que incidem diretamente sobre o duto e, conseqüentemente, sobre o leite. Para garantir a exposição máxima do leite à luz UV-C, essa área é envolvida por uma câmara em formato cilíndrico, feita em alumínio (a1), que também serve para isolar a seção de irradiação. As extremidades da câmara possuem tampas circulares removíveis, facilitando a limpeza e manutenção. Uma extremidade está conectada a um sistema de refrigeração, enquanto a outra está ligada a um sistema de exaustão, ambos localizados fora da seção de irradiação. Esses sistemas têm como função reduzir a temperatura do leite e eliminar o ozônio gerado pela interação da luz UV-C com o oxigênio atmosférico.

Já o circuito externo (B), compreende os sistemas de refrigeração (b1) e exaustão (b2), além da bomba (b5), o duto de recirculação em PVC (b3), os mecanismos de controle para operação da lâmpada UV-C e da bomba, bem como, uma câmara de resfriamento encamisada com gelo (b4). Diferentemente da seção de UV-C (A), o circuito externo não requer isolamento, uma vez que sua função principal é o controle térmico e a recirculação do leite. Nessa região, encontram-se localizadas

A função da câmara de resfriamento com camisa de gelo é manter o leite a temperaturas mais baixas, por condução, evitando que a temperatura do leite se eleve excessivamente durante o tempo de tratamento. A câmara onde o leite é inserido e retirado também é removível, facilitando a limpeza dessa região. A área conta ainda com termohigrômetros para monitorar a temperatura nas extremidades de entrada e saída do fluido, bem como a temperatura interna do leite, garantindo que todas as condições sejam adequadas ao processo.

#### ***4.1.2 Materiais para construção do aparato experimental de radiação UV-C***

A estrutura do aparato experimental que envolve a seção de radiação, trata-se de uma câmara em formato cilíndrico com 120 cm de comprimento e 32 cm de diâmetro, fabricado em alumínio, visando à reflexão interna dos raios de luz e o isolamento da seção. A lâmpada

UV-C (130 W) com 19 mm de diâmetro e 84,5 cm de comprimento utilizada no aparato foi fornecida pelo Laboratório de Fotônica do Instituto Federal do Ceará (IFCE). Para a circulação do leite na seção de aplicação do UV-C, foram empregados alguns testes em um duto de politetrafluoretileno (PTFE/Teflon) com diâmetro interno de 2 mm e comprimento total de 6,5 m, mesmo material utilizado por Feng et al. (2013) e Pendyala et al. (2022) em trabalhos semelhantes.

Os demais materiais necessários para a construção foram adquiridos em comércio local de Fortaleza - CE. Entre esses materiais, destacaram-se: uma mini bomba diafragma OEM 12VDC (modelo RS-385) com vazão de  $3,75 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , três termohigrômetros digitais para monitoramento da temperatura do sistema e da amostra, um Mini Ar Condicionado Portátil Climatizador Arctic Air e um exaustor Sicflux Sonora 14 Bivolt, ambos para ventilação interna e remoção do ozônio gerado no sistema, e um duto de PVC de 8 mm de diâmetro e 3 m de comprimento, utilizado fora da seção irradiada, para conduzir o leite entre as diferentes partes do aparato.

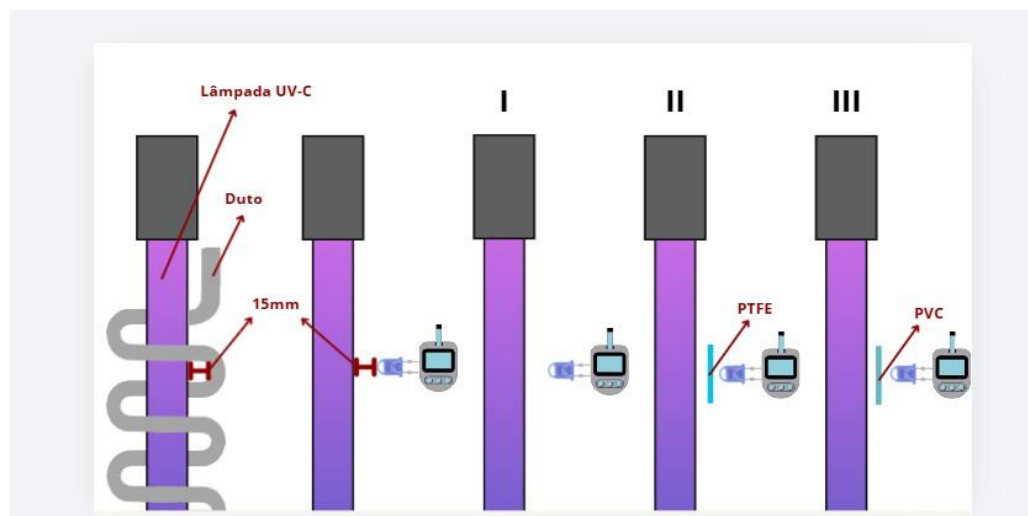
#### ***4.1.3 Avaliação da transmitância dos dutos na seção de aplicação do UV-C***

Neste estudo, foi realizada a seleção do duto mais adequado para condução do leite pela área de aplicação de radiação UV-C, visando garantir que a luz UV-C irradie o leite da forma mais eficiente possível. Para isso, foi essencial selecionar um material do duto que permitisse a passagem da radiação sem a bloquear, assegurando que os fótons UV-C atingissem o leite adequadamente. Além disso, optou-se por padronizar o tamanho da seção transversal do duto na região de aplicação da radiação, estabelecendo um diâmetro máximo de 2 mm.

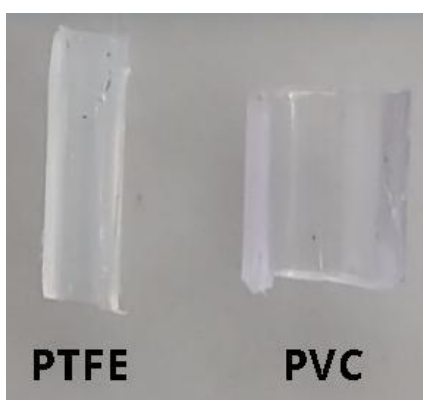
Para garantir o funcionamento adequado do sistema, foram realizadas medições da intensidade da radiação UV-C utilizando um espectrofotômetro, modelo CCS200 da Thorlabs, com comprimento de onda na faixa entre 200 e 1000 nm. Esse procedimento foi fundamental para verificar se a radiação estava sendo transmitida de forma adequada para o leite.

As medições (Figura 8) foram realizadas fixando o espectrofotômetro de maneira radial em relação à lâmpada, permitindo que o equipamento realizasse a leitura da intensidade. Inicialmente, a intensidade foi mensurada diretamente da lâmpada, e em seguida, realizaram-se leituras adicionais obstruindo o orifício do espectrofotômetro com pedaços das tubulações de PTFE (Teflon) e PVC. O objetivo foi comparar o percentual de comprimentos de onda captados com e sem a obstrução com os materiais, avaliando a diferença na transmissão da radiação UV-C através de cada um deles.

Figura 8 – Medições da intensidade UV-C na seção irradiada com diferentes materiais de duto.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2025). (a) Esquema ilustrativo das leituras realizadas, (b) Cortes nas tubulações de PTFE (Teflon) e PVC para realização das leituras.

#### 4.1.4 Avaliação da dose UV-C emitida pela lâmpada

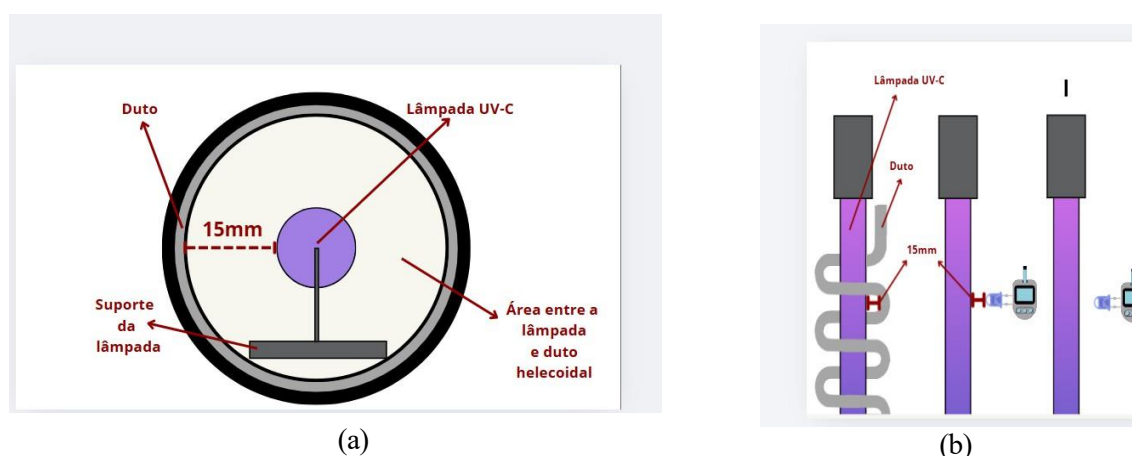
A quantificação da dose de radiação UV-C emitida foi realizada com o auxílio de um equipamento protótipo de baixo custo baseado no NukeMeter, um medidor portátil de intensidade UV-C desenvolvido com componentes de código aberto e projetado para aplicações experimentais. O dispositivo é composto por um sensor de radiação GUVA-S12SD, sensível à faixa de comprimento de onda 240–370 nm, acoplado a um microcontrolador (como o Arduino UNO), que realiza a leitura contínua do sinal analógico gerado pelo sensor.

O sinal de saída do GUVA-S12SD, que varia conforme a intensidade de luz UV incidente, é convertido em um valor digital por meio do conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador. Essa leitura, em milivolts, é então processada utilizando uma equação

empírica de calibração, ajustada previamente com base em uma fonte de radiação UV-C rastreadável.

O sensor foi posicionado a uma distância fixa de 15 mm da superfície da lâmpada (Figura 9), com orientação perpendicular ao feixe de emissão. Essa distância foi escolhida por representar a posição aproximada do duto helicoidal condutor de leite no sistema experimental avaliado, simulando, portanto, as condições de irradiação às quais o fluido seria submetido durante o processamento.

Figura 9 – Posicionamento do sensor GUVA-S12SD para medição da irradiância UV-C.



Fonte: Autor (2025). (a) Espaçamento entre a lâmpada e a tubulação e (b) Posição entre a lâmpada e o sensor, baseado na distância entre lâmpada e tubulação.

As medições foram registradas em seis tempos de exposição diferentes: 300, 450, 600, 900, 1200 e 1800 segundos. Para cada tempo, a irradiância (em  $W/m^2$ ) foi registrada diretamente pelo medidor UV-C ao longo do tempo. Os dados foram posteriormente analisados por meio de regressão linear simples, utilizando a irradiância como variável dependente ( $Y$ ) e o tempo como variável independente ( $X$ ). A análise objetivou verificar a linearidade do sistema, o que é esperado para fontes de irradiação constante. Com base nesta equação, foi possível calcular a dose média para diferentes tempos de exposição, multiplicando-se a irradiância pelo tempo de exposição (WANG et al., 2024a). A dose acumulada foi obtida em Joules por metro quadrado ( $J/m^2$ ), que representa a energia total recebida pelas amostras durante o tratamento.

As mensurações foram realizadas em triplicata, e os valores médios foram utilizados para análise. A estabilidade da emissão da lâmpada durante os ensaios foi verificada com base na repetibilidade dos resultados obtidos.

A dose de radiação UV-C efetiva foi determinada considerando-se a transmitância da tubulação à radiação UV-C no comprimento de onda de 254 nm. Para isso, a dose acumulada foi multiplicada pela fração transmitida, conforme equação 1:

$$\text{Dose UV-C efetiva} = \text{Dose UV-C acumulada} \times \text{Transmitância} \quad (\text{equação 1})$$

Essa abordagem permitiu estimar a real intensidade de radiação incidente sobre o fluido no interior do duto, considerando as perdas ópticas promovidas pelo material.

## **4.2 Funcionamento e manutenção do aparato experimental de radiação UV-C**

### ***4.2.1 Aplicação do tratamento através do aparato experimental de radiação UV-C***

Inicialmente, os dutos do sistema foram completamente preenchidos pelo fluido a ser irradiado, eliminando o ar durante o processo. Em seguida, a lâmpada foi acionada, agregada aos sistemas de refrigeração, exaustão, os termohigrômetros e a bomba, que realizou a circulação do fluido no sistema. O leite foi, foi exposto à luz por um intervalo de tempo proporcional à dosagem de radiação UV-C desejada. Esse tempo leva em consideração a quantidade de energia que atinge a amostra.

Ao final do tempo necessário para aplicar a dosagem requerida, a lâmpada é desligada, assim como a válvula de sucção, interrompendo a entrada de leite no sistema. O leite presente nos dutos foi então escoado para a câmara, onde a amostra foi retirada. O volume de leite irradiado, por batelada, foi padronizado em 200 mL.

### ***4.2.2 Limpeza do aparato experimental de radiação UV-C***

A limpeza do aparato experimental de radiação UV-C foi realizada seguindo o protocolo Cleaning in Place (CIP), que dispensa a desmontagem do equipamento para a higienização, a qual ocorreu por meio do bombeamento de soluções em fluxo turbulento através dos dutos.

O procedimento CIP adotado foi baseado em adaptações de estudos anteriores, seguindo a ordem: inicialmente, a estrutura foi lavada com água destilada aquecida a 40°C, seguida pela lavagem com 250 mL de solução de HCl 0,1 N, posteriormente por uma terceira lavagem com 250 mL de solução de NaOH 0,1 N, ambas por um tempo de contato de 10

minutos. Após a lavagem com detergentes, os dutos foram percorridos com água destilada corrente e em temperatura ambiente para a retirada de resquícios do reagente. Em seguida, houve a aplicação da solução sanitizante de hipoclorito de sódio (300-375 ppm de cloro ativo) por 10 minutos, configurando a etapa de sanitização. O processo foi finalizado com a passagem contínua de 2 L de água destilada pelo sistema, até a retirada de todo líquido do sistema. A higienização foi realizada antes e após o uso do equipamento, além de ser aplicada entre diferentes tratamentos (ATIK; GUMUS, 2021; GOPISETTY et al., 2018).

### **4.3 Validação dos tratamentos UV-C aplicados pelo aparato experimental**

#### ***4.3.1 Amostras de leite utilizadas***

As amostras submetidas ao tratamento UV-C foram de leite UHT integral (marca Betânia), adquirido em comércio local na cidade de Fortaleza - CE e leite cru doado pela indústria de laticínios Caraúbas LTDA, localizada na cidade de Caucaia - CE.

#### ***4.3.2 Eficácia do tratamento de radiação UV-C em diferentes tipos de leite***

A avaliação da eficácia do tratamento proposto foi realizada em duas etapas: aplicação da radiação UV-C em leite UHT inoculado com *Escherichia coli* não patogênica (ATCC 25922) e posteriormente em leite cru coletado em indústria de laticínios. O leite UHT foi escolhido por ser considerado microbiologicamente inerte em decorrência do tratamento térmico, envase asséptico e embalagem asséptica cartonada de seis camadas aos quais é submetido. A inoculação de *E. coli* neste tipo de leite foi realizada para garantir a avaliação da radiação UV-C sobre uma concentração conhecida desta bactéria, eliminando interferências da microbiota em geral e viabilizando a condução padronizada dos ensaios.

A aplicação da radiação UV-C em leite cru foi efetuada, posteriormente, para representar as condições microbiológicas reais do leite a ser processado na indústria, o qual continha a carga microbiana oriunda do manejo de obtenção, do transporte e do armazenamento.

##### ***4.3.2.1 Ativação da cultura estoque de *E. coli****

A cepa bacteriana *E. coli* não patogênica (ATCC 25922) utilizada neste estudo foi obtida do Laboratório de Microbiologia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC).

A sua ativação ocorreu a partir de estoque mantido em tubos com meio TSA inclinado. Para isto, uma alçada do cultivo foi transferida assepticamente para tubos contendo 5 mL de caldo tripton de soja (TSB, Difco) e incubados a 35 °C por 24 horas. Em seguida, 0,1 mL do cultivo do caldo foi semeada em placas de ágar tripton de soja (TSA, Difco), com incubação a 35 °C por 24 horas, para promover o crescimento de colônias isoladas.

Após o período de incubação, colônias foram selecionadas e novamente transferidas para tubos com 5 mL de TSB (Difco), sendo incubadas a 35 °C por mais 24 horas. Essa etapa teve como finalidade a obtenção de suspensão bacteriana uniforme em meio líquido, adequada para a padronização do inóculo. Posteriormente, as concentrações das suspensões bacterianas foram ajustadas por meio de diluições seriadas em água peptonada a 0,1% (Difco), até se atingir a concentração final de  $10^9$  unidades formadoras de colônia por mililitro (UFC/mL), conforme descrito por Dias (2019) e Ugart (2012).

#### 4.3.2.2 Seleção dos tratamentos de radiação UV-C em leite UHT inoculado com *E. coli*

Uma alíquota de 10 mL da suspensão de *E. coli* ativada ( $10^9$  UFC/mL) foi adicionada a 10 litros de leite UHT integral (marca Betânia), resultando em uma concentração final de  $10^6$  UFC/mL. Após a inoculação, o leite foi distribuído em alíquotas de 200 mL para posterior submissão aos tratamentos com radiação UV-C.

A aplicação de UV-C no leite inoculado ocorreu em três diferentes tempos para avaliar a redução da carga de *E. coli*. Cada tempo de exposição foi proporcional a uma dose específica de UV-C, que foi analisada paralelamente durante o processo. No primeiro tratamento, o leite foi bombeado no sistema de radiação por 30 minutos (1800 segundos), tempo equivalente à pasteurização lenta. Nos dois tratamentos seguintes, o leite circulou no sistema exposto à luz UV-C por 15 e 7,5 minutos (900 e 450 segundos, respectivamente).

#### 4.3.2.3 Aplicação dos tratamentos selecionados nas amostras de leite cru

Os tratamentos mais eficazes na redução da carga microbiana no leite inoculado, foram selecionados para serem aplicados ao leite cru. Para isso, o leite cru foi dividido em seis porções (Tabela 3) submetidos aos dois melhores tratamentos, em três repetições (trios), além de uma amostra controle, a qual não passou por nenhum tratamento, totalizando sete amostras.

Tabela 3 - Distribuição das amostras de leite cru entre os tratamentos selecionados e controle, com respectivas repetições experimentais.

<b>Tratamentos</b>	<b>C</b>	<b>T1</b>			<b>T2</b>		
<b>Repetições</b>	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7

Fonte: Autor (2025). C – Controle (leite não tratado), T1 e T2 – Os dois tratamentos mais eficientes selecionados, L – Diferentes porções de leite com suas respectivas numerações, relacionados às diferentes bateladas de leite cru, incluindo a amostra controle e as demais amostras submetidas aos tratamentos UV-C.

Após serem irradiadas, análises microbiológicas e físico-químicas das sete amostras foram avaliadas, visando identificar a ocorrência de modificações decorrentes do processo de radiação UV-C.

#### 4.4 Avaliação microbiológica das amostras de leite cru irradiadas

A avaliação microbiológica foi realizada nas sete amostras, em triplicata. Para isso, foram feitas as contagens de microrganismos mesófilos, de colônias típicas de *Staphylococcus aureus*, enterobactérias e de *E. coli*.

A contagem de microrganismos mesófilos foi realizada utilizando o método de plaqueamento em profundidade (APHA, 2015). Para isso, foram preparadas diluições seriadas, das quais foi inoculado 1 mL de cada amostra em profundidade de Ágar Padrão para Contagem (PCA). Após a solidificação do meio, as placas foram invertidas e incubadas a 35 °C por 48 horas. As placas com 25 a 250 colônias foram selecionadas e o número de Unidades Formadoras de Colônia por mililitro de amostra (UFC/mL) foi quantificado.

A contagem de colônias típicas de *Staphylococcus aureus* foi realizada de acordo com American Public Health Association (APHA, 2015), onde 0,1 mL das respectivas diluições das amostras de leite foram semeadas na superfície de Ágar Baird-Parker (BP), sendo as placas incubadas durante 48 h em estufa à 35 ± 2 °C contagem das colônias características.

Para a contagem de enterobactérias, 0,1 mL diluições das amostras de leite foram semeadas em superfície de ágar cristal violeta vermelho neutro bile glicose (VRBG). As placas foram invertidas e incubadas à 36 ± 1 °C por 18 a 24 horas, para posterior leitura das placas que apresentaram entre 25 e 250 UFC/mL (APHA, 2015).

Para a contagem das colônias típicas de *E. coli*, as amostras de leite foram plaqueadas em Ágar Levine Eosina Azul de Metileno (L-EMB) e incubadas a 35 °C durante 24

horas. As colônias típicas se caracterizam como nucleadas, com centro opaco da cor preta, podendo ou não apresentar brilho metálico e foram contadas (APHA, 2015).

#### 4.5 Análise do regime de escoamento: Números de Reynolds e Dean

O número de Reynolds para determinação do tipo de escoamento promovido no fluido durante a passagem pelo equipamento foi determinado pela equação 3 (BANDLA et al; 2012).

$$Re = \frac{\rho}{\mu} \cdot V \cdot D \quad (\text{equação 2})$$

Onde  $\rho$  – Densidade do leite,  $\mu$  – Viscosidade do leite,  $V$  – Velocidade de escoamento do leite e  $D$  – Diâmetro do duto.

Tabela 4 – Classificação dos Regimes de Escoamento com Base nos Números de Reynolds ( $Re$ ) e Dean ( $De$ ).

Número de Dean ( $De$ )	Regime de Escoamento	Descrição
$De < 10$	Laminar com pouca influência da curvatura	Escoamento semelhante ao de um tubo reto.
$10 < De < 100$	Laminar com vórtices de Dean bem formados	Escoamento se reorganiza em duas células contra-rotativas.
$De > 100$	Transição para turbulência	O escoamento se torna instável e turbulento.

Fonte: Adaptado de WHITE, 2016; MOGHADDAM; GHOMSHAHI, 2024.

O Número de Dean é considerado um parâmetro relevante para a desinfecção de microrganismos em reatores UV-C de tubo helicoidal devido à homogeneidade da dose de UV-C em reatores desse tipo aumenta com a elevação do número de Dean e turbulência (JUNQUA; VINSONNEAU; GHIDOSSO, 2020). Diante disso, o número de Dean promovido pelo escoamento helicoidal do aparato experimental foi determinado de acordo com Moghaddam e Ghomshahi (2024), expresso na equação 4.

$$De = Re \cdot \sqrt{\square} \quad (\text{equação 3})$$

Onde  $Re$  - Número de Reynolds,  $d$  - Diâmetro hidráulico do tubo (m),  $D$  - Raio de curvatura do tubo (m).

A relação entre os valores de  $Re$  e  $De$  (Tabela 4), foram utilizados para determinar o regime de escoamento do fluido.

#### **4.6 Estudo comparativo das propriedades intrínsecas das amostras de leite cru irradiadas e não irradiadas**

A avaliação das amostras de leite cru submetidas à radiação UV-C foi conduzida com base na comparação com uma amostra controle, não irradiada, visando identificar possíveis alterações nas propriedades físico-químicas e estruturais do fluido. Para isso, foram empregadas análises físico-químicas e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR).

Foram analisadas seis amostras de leite irradiada (três para cada condição de tratamento) e uma amostra controle, totalizando sete amostras. As determinações foram realizadas em triplicata, assegurando a confiabilidade dos resultados. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Laticínios do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará.

##### ***4.6.1 Caracterização físico-química das amostras de leite cru irradiadas e não irradiadas***

###### ***4.6.1.1 Potencial hidrogeniônico (pH)***

O pH foi aferido com a utilização de um pHmetro digital OHAUS (Starter 300), de acordo com AOAC (2011).

###### ***4.6.1.2 Acidez titulável***

A determinação da acidez titulável do leite foi feita por meio da titulação de 50 mL da amostra de leite, acrescida de 4 gotas do indicador fenolftaleína 1% (m/v), utilizando uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol/L, como neutralizante (CRUZ, 2016; IAL, 2008).

#### *4.6.1.3 Colorimetria*

Foram realizadas as análises de cor através do sistema CIE Lab\*, fazendo uso de um colorímetro MINOLTA (modelo CR 400). Foram submetidas à aferição as amostras de leite antes e depois do respectivo tratamento UV-C.

#### *4.6.1.4 Avaliação de viscosidade e densidade*

A viscosidade foi aferida por meio do viscosímetro rotacional HAAKE (modelo ViscoTester 6L). A densidade, por sua vez, foi determinada utilizando um lactodensímetro e expressa em g/mL a 15°C.

#### *4.6.1.5 Crioscopia*

O índice crioscópico foi verificado por meio do crioscópio (modelo MK 540, marca ITR) e expresso em °Hortvet (°H).

### ***4.6.2 Caracterização físico-química das amostras de leite cru irradiadas e não irradiadas***

Para a caracterização físico-química, amostras de leite cru foram submetidas à radiação UV-C em estado líquido. Após o tratamento, as amostras foram divididas em dois grupos: uma parte permaneceu na forma líquida, enquanto a outra foi submetida à liofilização. O objetivo foi possibilitar a análise espectroscópica em ambas as formas físicas líquida e seca dos mesmos lotes de amostras, irradiadas e não irradiadas.

#### *4.6.2.1 Preparo das amostras por Liofilização*

A liofilização das amostras foi realizada em equipamento de congelamento e sublimação sob vácuo (modelo LS3000, marca TERRONI). O processo foi conduzido de forma a promover a remoção da água sem comprometer a integridade estrutural dos constituintes da matriz láctea. Essa etapa teve como finalidade possibilitar análises espectroscópicas em amostras secas, complementares às análises realizadas em amostras líquidas. A comparação entre os dois estados físicos permite avaliar se o estado físico do leite influencia na resposta espectral ao tratamento com radiação UV-C e verificar a sensibilidade de diferentes componentes da matriz às possíveis alterações estruturais.

#### 4.6.2.2 Espectroscopia de Infravermelho (FT-IR)

As medições de infravermelho das amostras foram realizadas com um espectrômetro (IR-Tracer100, Shimadzu), equipado com um acessório de refletância total atenuada (ATR) de salto único, pertencente à central analítica do programa de Pós-Graduação em Química (PGQUIM) da UFC. As amostras líquidas foram aplicadas diretamente sobre o cristal. Os espectros foram gerados a partir da média de 64 varreduras, na faixa de 600 a 4.000  $\text{cm}^{-1}$ , com uma resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ . A amostra liofilizada foi triturada com KBr em almofariz de ágata e, em seguida, comprimida à pressão de 80 kN utilizando uma prensa hidráulica.

#### 4.7 Análise Estatística

Os dados obtidos nas análises, em triplicata, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas através do teste de Tukey a 5% de significância. Os dados foram avaliados através do software Statistica 10.0 (STATSOFT, 2017).

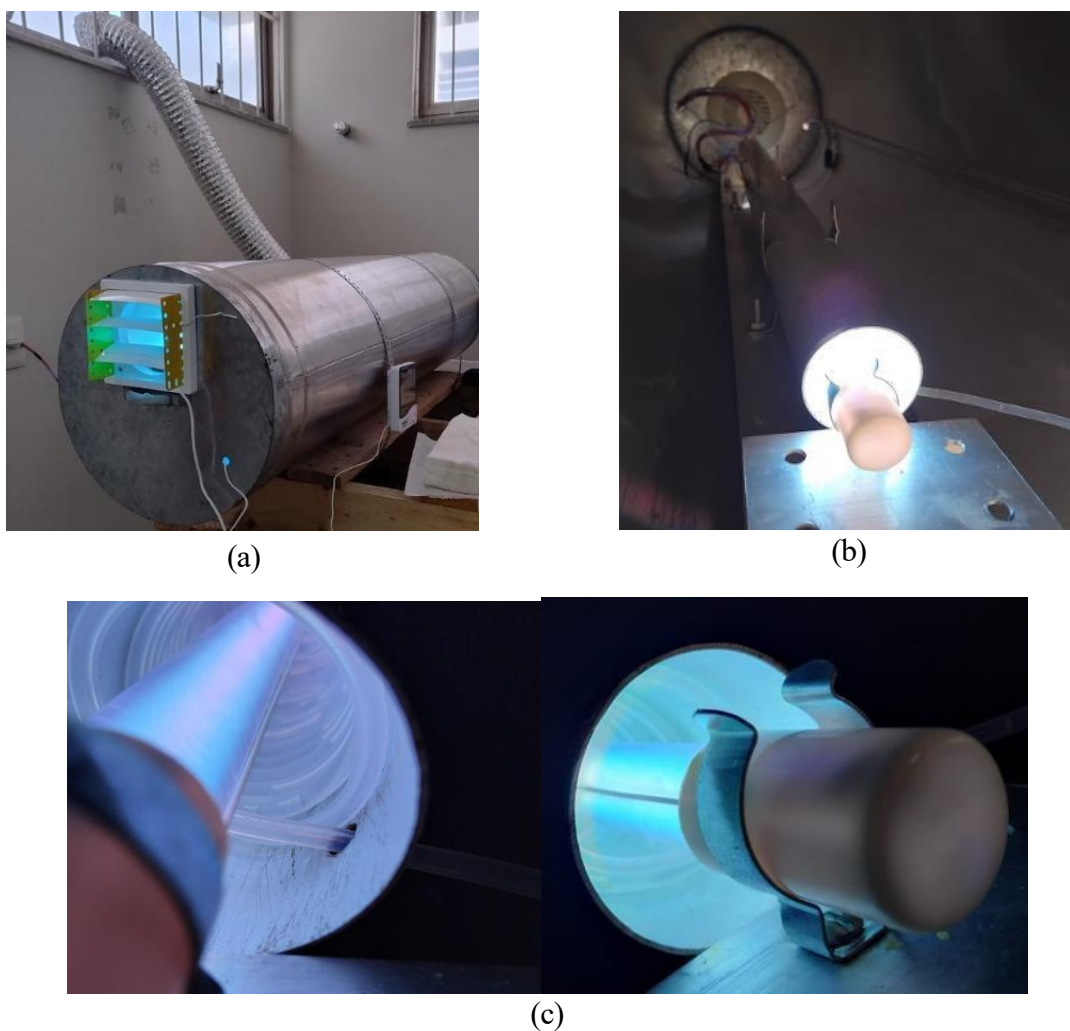
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Aparato Experimental Consolidado

#### 5.1.1 Aspectos gerais do aparato experimental

As imagens de diferentes perspectivas do aparato experimental desenvolvido para aplicação de diferentes tratamentos da radiação UV-C podem ser observadas na Figura 10.

Figura 10 – Diferentes perspectivas do aparato experimental para aplicação da radiação UV-C em leite.





(d)

Fonte: Autor (2025). a) Região externa da seção de radiação UV-C, sem o sistema de dutos, (b) Região interna da seção de irradiação UV-C com o cilindro de sustentação do duto helicoidal, (c) Lâmpada UV-C irradiando o duto helicoidal e (d) Aparato experimental completo e em funcionamento.

Os parâmetros fixos utilizados no sistema UV-C do aparato experimental, independentemente do tratamento aplicado, estão apresentados na tabela 5. As amostras líquidas processadas (leite UHT e leite cru) foram irradiadas de forma contínua sob uma potência total de lâmpada de 130 W, sendo que 18,28 W correspondiam à radiação emitida na faixa UV-C (254 nm). O duto utilizado no sistema apresentou transmitância de 33% à radiação UV-C, o que influenciou diretamente na dose efetiva recebida pelo fluido.

Tabela 5 – Variáveis fixas do Sistema UV-C no aparato experimental.

Parâmetros	Dados
CA	Líquido
I	Contínua
PA	130 W
PUV-C	18,28 W
Q	$3,75 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
$D_A$	0,03 m
$E_I$	0,002 m

Fonte: Autor (2025). CA – Condição da amostra irradiada; I – Forma de incidência da luz; PA – Potência total da lâmpada utilizada; PUV-C – Potência da lâmpada na frequência UV-C (254 nm); Q – Vazão volumétrica aplicada ao fluido no sistema;  $D_A$  – Distância entre a lâmpada e a amostra;  $E_I$  – Espessura do fluido irradiado.

A vazão aplicada ao sistema foi de  $3,75 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , promovendo um escoamento controlado em regime laminar. A distância entre a lâmpada e o fluido foi de 0,015 m, e a espessura do fluido irradiado foi de 0,002 m, parâmetros que favorecem a exposição uniforme à radiação ao longo do trajeto.

Ao analisar exclusivamente a temperatura do leite (Tabela 6), observa-se que os tratamentos T1 e T2 mantiveram o fluido próximos da faixa de 25 °C, frequentemente adotada como referência em estudos de UV-C.

**Tabela 6 – Temperaturas registradas no equipamento e no leite durante os tratamentos UV-C.**

<b>Regiões Monitoradas</b>	<b>Temperatura T1 (°C)</b>	<b>Temperatura T2 (°C)</b>	<b>Temperatura T3 (°C)</b>
<b>Entrada do Aparato</b>	32,48 ± 11,65	40,67 ± 12,86	45,03 ± 13,42
<b>Saída do Aparato</b>	22,52 ± 1,23	22,70 ± 0,58	23,23 ± 0,68
<b>Leite</b>	18,80 ± 3,92	24,57 ± 7,80	28,23 ± 7,64

Fonte: Autor (2025). T1 - Tratamento com tempo de exposição de 450 segundos / T2 - Tratamento 2 com tempo de exposição de 900 segundos / T3 - Tratamento 3 com tempo de exposição de 1800 segundos. Resultados expressos como média das respectivas repetições ± desvio padrão.

Na entrada do aparato, região mais distante do resfriamento e mais próxima da fonte emissora, observaram-se os maiores valores térmicos (até  $45,03 \pm 13,42 \text{ °C}$  no T3). Ainda assim, é importante destacar que essas temperaturas representaram picos localizados e não refletiram a temperatura média do leite, a qual permaneceu consideravelmente menor. As variações elevadas nessa região podem ter ocorrido devido ao sensor do termohigrômetro ter ficado muito próximo à instalação elétrica da lâmpada, a qual gerou uma certa zona de calor.

É importante ressaltar que houve um período de ganho de temperatura, o qual se estabilizou após o intervalo de tempo que variou de 8 à 16 minutos. Esta característica pode estar relacionada ao funcionamento padrão da lâmpada, onde pode ser realizado um estudo mais aprofundado na variação de frequências de ondas emitidas até a estabilização na frequência UV-C (254nm).

O aumento de temperatura pode também estar associado à bomba utilizada. Sciuto et al. (2025) analisaram através de termografia infravermelha que bombas diafragma podem transferir calor para o fluido bombeado, dependendo de suas propriedades reológicas.

A saída do aparato, onde está localizado o sistema de resfriamento, manteve as menores temperaturas e alta estabilidade, variando de  $22,52 \pm 1,23 \text{ °C}$  (T1) a  $23,23 \pm 0,68 \text{ °C}$  (T3). Isso demonstra que a preocupação com a instalação de um sistema de resfriamento foi

válida por atenuar o calor gerado pela lâmpada UV-C, mantendo o leite próximo da temperatura ambiente.

A temperatura média do leite ao longo dos tratamentos reforça a natureza não térmica do processo. Mesmo no tempo mais prolongado (1800 s), a temperatura média foi de  $28,23 \pm 7,64$  °C, valor inferior à temperatura natural do leite recém-ordenhado, que normalmente varia entre 35 e 38 °C. Schütz et al. (2023) apontam que a temperatura corporal de vacas leiteiras varia entre 37,8 °C e 39,3 °C, com média entre 38,45 °C e 38,56 °C, dependendo do manejo. Tais valores representam a temperatura interna do animal, que é muito próxima da temperatura do leite no interior do úbere imediatamente antes da extração. Com isso, ainda que haja um incremento térmico proporcional ao incremento da dose (e tempo de exposição), concluíram que o sistema funcionou dentro de um regime essencialmente não térmico.

Parte dos estudos consultados na literatura acerca da aplicação da radiação UV-C em alimentos não contempla, de maneira sistemática, os efeitos da temperatura ao longo do tratamento. Wang et al. (2021), por exemplo, ressaltam que a interação entre temperatura e radiação pode influenciar significativamente a eficácia do processo, bem como as características físico-químicas e microbiológicas do produto tratado.

Wang et al. (2021), por exemplo, adotaram 25 °C como temperatura de processo, sem apresentar justificativa ou qualquer medição instrumental. Pendyala et al. (2022), cujo sistema helicoidal inspirou o presente estudo, apenas mencionaram a utilização de um sistema de ventilação capaz de manter a temperatura em 25 °C, não diferenciam entre a temperatura do equipamento e a do fluido, nem apresentaram dados estatísticos que demonstraram essa estabilidade térmica.

Em contraste, Pihen et al. (2023) mensuraram a temperatura das amostras irradiadas em repouso utilizando um termopar (SDL200, Extech Instruments, Estados Unidos) e observaram que o tratamento com UV-C resultou em um aumento máximo de  $3,2 \pm 0,80$  °C, enquanto o tratamento com UV-LED não apresentou aumento térmico significativo em tratamentos que variaram de 0 à 2100 segundos de exposição. O incremento de temperatura relatado por Pihen et al. (2023) foi semelhante ao observado no tratamento T1 (450 segundos) do presente estudo, embora seja importante destacar que os autores utilizaram um sistema em repouso, o que difere do arranjo com escoamento contínuo aplicado no presente estudo.

A análise das temperaturas registradas nas três regiões monitoradas indicou que o tratamento UV-C no sistema helicoidal promoveu aquecimento brando, insuficiente para caracterizá-lo em processo térmico.

Entre os tratamentos, T1 apresentou as menores temperaturas absolutas e manteve o fluido mais frio mesmo quando considerada a variabilidade dos dados, demonstrando o melhor controle térmico. Embora T2 tenha exibido média mais próxima de 25 °C, T3 foi o único a mostrar aumento expressivo, compatível com seu maior tempo de exposição, mas ainda assim permaneceu abaixo da temperatura fisiológica do leite recém-ordenhado (aproximadamente 37 °C), reforçando o caráter não térmico do processo.

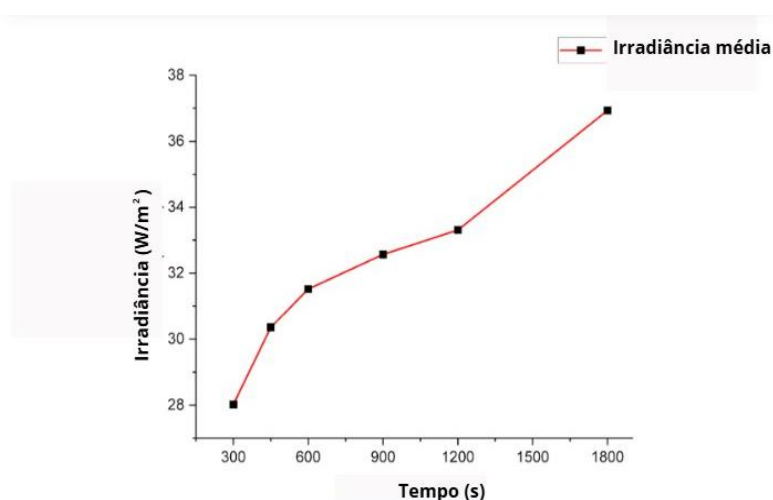
Observou-se também que a entrada do leite em condições de resfriamento favoreceu a manutenção de sua qualidade microbiológica, de modo que processos que resultam em menores elevações térmicas são mais adequados. Nesse contexto, T1 se destacou como o tratamento mais eficiente no controle da temperatura.

### 5.1.2 Dose aplicada e transmitância dos materiais dos dutos

#### 5.1.2.1 Regressão linear da irradiância UV-C em função do tempo

A relação entre a Irradiância (em  $W/m^2$ ) e o tempo de exposição (em segundos) está apresentada no gráfico 1. Observou-se uma tendência crescente, indicando que à medida que o tempo de exposição aumenta, a dose de irradiação também se eleva, característica esperada em sistemas de emissão constante de UV-C.

Gráfico 1 – Perfil temporal da irradiância UV-C no aparato experimental.



Fonte: Autor (2025).

O coeficiente de Pearson ( $r$ ) (Tabela 7) de 0,97216 confirmou a forte correlação linear entre tempo e dose, sugerindo que o modelo foi adequado para descrever essa relação. Além disso, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,94509 indicou que aproximadamente 94,5% da variação observada na irradiância pode ser explicada pelo tempo de exposição. O valor ajustado de  $R^2$ , 0,93137 reforçou a robustez do modelo, mesmo após o ajuste para o número de dados analisados.

Tabela 7 – Dados referentes à regressão linear do aparato experimental para aplicação da radiação UV-C em leite.

Parâmetro	Valor
Equação	$Y = 27,53132 + 0,00524 X$
Coeficiente Linear	27,53132
Coeficiente angular	0,00524
Coeficiente de Pearson ( $r$ )	0,97216
$R^2$	0,94509
$R^2$ (ajustado)	0,93137

Fonte: Autor (2025).

A equação da reta obtida,  $Y = 27,53132 + 0,00524 X$ , onde  $Y$  representa a irradiância instantânea em  $W/m^2$  e  $X$  o tempo de exposição em segundos. O coeficiente angular indica que a irradiância aumenta, em média,  $5,24 \times 10^{-2} W/m^2$  a cada segundo de exposição adicional à radiação UV-C. Isso significa que, para cada minuto de exposição, a dose cresce cerca de  $0,314 W/m^2$ , demonstrando uma taxa constante e previsível de acúmulo da radiação ao longo do tempo.

Tabela 8 – Irradiância média e doses acumuladas de radiação UV-C para cada tempo de exposição do leite tratado

Amostra	Irradiância média ( $W/m^2$ )	Dose acumulada ( $kJ/m^2$ )
T1	29,889	13,450
T2	32,247	29,023
T3	36,963	66,534

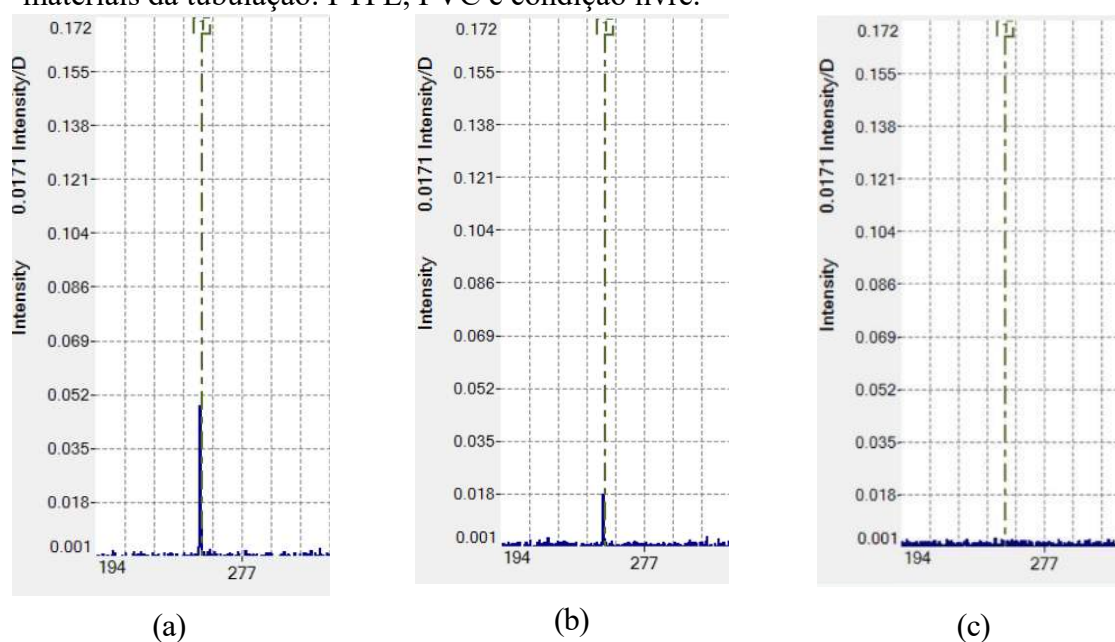
Fonte: Autor (2025). T1 - Tratamento com tempo de exposição de 450 segundos / T2 - Tratamento 2 com tempo de exposição de 900 segundos / T3 - Tratamento 3 com tempo de exposição de 1800 segundos.

Após a apresentação dos valores da regressão linear, as doses acumuladas foram estimadas para cada tratamento de radiação UV-C (Tabela 8). Em resumo, o aumento da dose de radiação UV-C foi diretamente proporcional ao tempo de exposição, com a taxa constante de incremento, importante para garantir a precisão e a repetibilidade de processos que dependem da exposição controlada à radiação UV-C.

### 5.1.2.2 Transmitância dos materiais da tubulação e Impacto na dose UV-C efetiva

Ao comparar as intensidades medidas pelo espectrofotômetro (Figura 11), foi possível determinar o percentual de luz UV-C que conseguiu atravessar o duto de PTFE.

Figura 11 – Intensidade da radiação UV-C (254 nm) em função da interferência dos materiais da tubulação: PTFE, PVC e condição livre.



Fonte: Autor (2025). (a) sem interferência (condição livre); (b) com interferência da tubulação de PTFE, e (c) com interferência da tubulação de PVC.

A intensidade captada pelo equipamento, com a obstrução causada pela tubulação de PTFE, foi cerca de um terço da intensidade total do UV-C emitida pela lâmpada, ou seja, aproximadamente 33 % da dose emitida conseguiu atingir efetivamente o leite, enquanto os outros 66 % foram refletidos ou absorvidos pelo material. Essa proporção se mostrou coerente com os resultados reportados em estudos semelhantes, conforme descrito por Gautam et al. (2017) e Chen et al. (2024). Já o PVC, o qual bloqueou completamente a passagem dos fótons UV-C através de sua superfície, tornando-o inadequado para uso na zona de irradiação. Assim, o tubo de PTFE foi utilizado na zona de irradiação do aparato, enquanto o PVC foi empregado

nas demais áreas, por ser um material mais acessível e de custo inferior, contribuindo para a redução do custo total do aparato.

Este teste revelou-se crucial não apenas para a seleção do material, mas também para a quantificação da dose calculada que efetivamente atinge a amostra, informação essencial para o entendimento dos parâmetros do processo. Tais dados não foram fornecidos ou detalhados em estudos que utilizaram o material PTFE como condutor da amostra. O trabalho de Feng et al. (2013), por exemplo, não apresentou essa informação, enquanto o estudo de Pendyala et al. (2022) mencionou que a transmitância foi de 60 %, mas não explicou a origem dessa informação, deixando uma lacuna quanto à determinação precisa da quantidade de energia que realmente atravessa o material do duto para impactar a amostra, ou seja, não foi feita a distinção entre a dose emitida e a dose efetivamente atuante no processo.

Os valores experimentais da dose UV-C emitida pela lâmpada e da dose efetiva estimada, ou seja, a quantidade de radiação UV-C que atravessa o material e chega à amostra estão apresentados na tabela 9. Para T1, a dose emitida de aproximadamente 13,45 kJ/m<sup>2</sup> foi reduzida para 4,48 kJ/m<sup>2</sup>, e para T2 de 29,02 kJ/m<sup>2</sup> para 9,67 kJ/m<sup>2</sup>.

Tabela 9 – Valores experimentais das doses UV-C emitidas pela lâmpada e doses efetivas considerando a transmitância do PTFE

<b>Parâmetros</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>Referência de tópico</b>
<b><i>Transmitância da tubulação</i></b>				
<b><i>para 254 nm</i></b>	0,33 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,33 ± 0,01	<b>4.1.3</b>
<b><i>(%)</i></b>				
<b><i>Dose UV-C emitida</i></b>	13,45 ± 0,47	29,02 ± 0,13	66,53 ± 0,07	<b>4.1.4</b>
<b><i>(kJ/m<sup>2</sup>)</i></b>				
<b><i>Dose UV-C efetiva</i></b>	4,48 ± 0,47	9,67 ± 0,13	22,17 ± 0,07	<b>4.1.4</b>
<b><i>(kJ/m<sup>2</sup>)</i></b>				

Fonte: Autor (2025). T1 - Tratamento 1, referente ao tempo de exposição de 450 segundos/ T2 - Tratamento 2, referente ao tempo de exposição de 900 segundos / T3 - Tratamento 3, referente ao tempo de exposição de 1800 segundos.

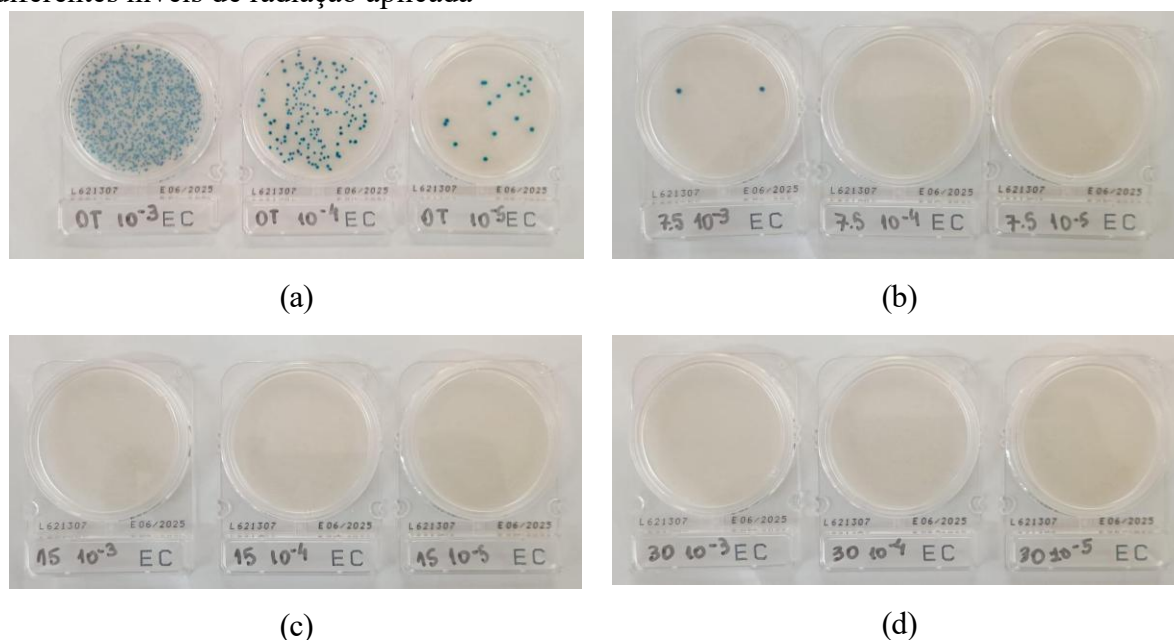
Esses dados mostraram a importância de considerar a transmitância do material ao calcular a dose real recebida pela amostra, evidenciando que a radiação UV-C dentro do sistema é significativamente menor do que a emitida pela fonte. Essa consideração foi essencial para a

avaliação precisa dos parâmetros ópticos do aparato experimental, garantindo a acurácia da dosimetria e a reprodutibilidade dos processos de irradiação.

## 5.2 Seleção de tratamentos por UV-C em leite UHT inoculado com *E. coli*

A investigação da eficácia da radiação UV-C em amostras de leite UHT inoculadas com *E. coli* demonstrou que os tratamentos empregados no aparato experimental foram capazes de reduzir efetivamente a carga microbiana inoculada nas amostras (Figura 12).

Figura 12 – Registro fotográfico das amostras de leite UHT inoculadas com *E. coli* frente a diferentes níveis de radiação aplicada



Fonte: Autor (2025). (a) - Placas referentes às diluições  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  da amostra de leite cru controle / (b) - Placas referentes às diluições  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  da amostra de leite cru submetidas ao T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) / (c) - Placas referentes às diluições  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  da amostra de leite cru submetidas ao T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>) / (d) - Placas referentes às diluições  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  da amostra de leite cru submetidas ao T3 (22,17 kJ/m<sup>2</sup>)

Todos os três tratamentos de radiação UV-C empregados resultaram na redução mínima de três ciclos logs na carga microbiana (Tabela 10), sendo que T2 e T3 possivelmente promoveram redução maior, já que nestas doses de radiação UV-C não foi observado o crescimento de colônias. A concentração de  $1,60 \times 10^6$  UFC/mL de *E. coli* inoculada no leite UHT (amostra C) apresentou redução para  $2,00 \times 10^3$  UFC/mL após ser submetida à dose efetiva de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> de radiação UV-C (amostra T1), equivalente à eliminação de aproximadamente 2,9 ciclos logarítmicos do microrganismo. As amostras T2 e T3 apresentaram

contagens inferiores a  $1,0 \times 10^3$  UFC/mL, indicando reduções logarítmicas superiores a 3,2. A dose de UV-C aplicada em T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>) apesar de ser menor, promoveu a mesma eficácia microbiológica que a aplicada em T3 (22,17 kJ/m<sup>2</sup>).

Tabela 10 – Contagem microbiana de *E. coli* nas amostras de leite UHT inoculado e irradiado com diferentes doses de UV-C.

<b>Amostras</b>	<b>Contagem de <i>E. coli</i> (UFC/mL)</b>
<b>C</b>	1,60 x 10 <sup>6</sup>
<b>T1</b>	2,00 x 10 <sup>3</sup>
<b>T2</b>	<10 <sup>3</sup>
<b>T3</b>	<10 <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2025). C - Amostra de leite UHT inoculada com *E. coli* não irradiada / T1 - Amostra de leite UHT inoculada com *E. coli*, tratada com dose efetiva de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> / T2 - Amostra de leite UHT inoculada com *E. coli*, tratada com dose efetiva de 9,67 kJ/m<sup>2</sup> / T3 - Amostra de leite UHT inoculada com *E. coli*, tratada com dose efetiva de 22,17 kJ/m<sup>2</sup>. Resultados expressos como média das respectivas repetições

A eficiência do sistema helicoidal foi comparada à de diferentes estudos na literatura. Pihen et al. (2023) utilizaram uma câmara UV-C em repouso com luz pulsada para tratar soluções simuladas inoculadas com *E. coli*. As amostras foram irradiadas a 255 nm por até 35 minutos, recebendo a dose de 385 kJ/m<sup>2</sup>. As reduções microbianas variaram conforme a composição da matriz, alcançando 5,5 ciclos logarítmicos em água, 4,4 e 4,5 em soluções com sacarose e tartrazina, e de 2,7 a 3,9 log em soluções com goma xantana combinadas com corantes e açúcares.

Em contraste, o sistema helicoidal desenvolvido neste estudo atingiu reduções superiores a 3,2 ciclos logarítmicos de  $1,60 \times 10^6$  UFC/mL de *E. coli* em leite UHT com apenas 15 minutos (900 segundos) de exposição, em dose efetiva de 9,67 kJ/m<sup>2</sup>, o que representa menos de 3 % da dose aplicada por Pihen. Tal eficiência pode ser atribuída à dinâmica do fluxo helicoidal, que favoreceu a renovação constante da superfície de leite irradiada e melhor homogeneização da matriz alimentar, mesmo ela sendo opaca e viscosa.

Outro estudo de referência é o de Gautam et al. (2017) que avaliou reatores UV-C helicoidais do tipo Dean-flow na descontaminação de água de coco verde inoculada com *E. coli*. Tubos com diâmetros internos de 1,6 mm e 3,2 mm sob números de Reynolds variando entre 198,8 e 596,4 (regime laminar) foram testados. A maior redução, de 5,76 log, ocorreu

com o tubo de 1,6 mm e  $Re = 596,4$ , atribuída à menor espessura do fluido, o que favorece maior exposição à radiação.

O sistema deste estudo, que utilizou um tubo de 2 mm de diâmetro interno também sob regime laminar, obteve redução superior a 3 log após 900 segundos de exposição efetiva (9,67 kJ/m<sup>2</sup>). A semelhança entre os sistemas quanto à configuração helicoidal e ao regime de escoamento reforça a validade da comparação, sendo importante destacar que o leite apresenta opacidade superior à água de coco, o que aumenta o desafio da inativação microbiana.

A pesquisa de Pendyala et al. (2022) também utilizou um sistema helicoidal, com foco na inativação de esporos de *Bacillus cereus* em leite integral e leite de amêndoas. Reduções de aproximadamente 4 ciclos logaritmos foram promovidas após seis passagens em leite integral com vazão de  $1,17 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s e após dez passagens em leite de amêndoas com vazão de  $2,70 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s.

Em comparação, o sistema do presente trabalho operou com uma vazão de  $4,25 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s em fluxo contínuo, utilizando doses efetivas UV-C de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> (T1) e 9,67 kJ/m<sup>2</sup> (T2). Observou-se ausência de crescimento até a diluição  $10^{-3}$ , sugerindo reduções logarítmicas superiores a 3,0, com possível alcance de 6,0 log.

Além disso, estudos de Choudhary et al. (2011) e Bandla et al. (2012), os quais empregaram tubos de 1,6 mm, relataram reduções entre 2,65 e 3,29 log em diferentes matrizes lácteas. O presente sistema, com tubo de 2 mm, demonstrou desempenho comparável ou superior, mesmo frente aos desafios impostos pela elevada opacidade do leite.

Diante dos resultados obtidos, o sistema helicoidal UV-C demonstrou desempenho eficiente na redução microbiana de *E. coli* em leite UHT, mesmo em uma matriz opaca. As reduções superiores a 3 log, com ausência de crescimento nas amostras T2 e contagens significativamente reduzidas em T1, evidenciaram o potencial do aparato experimental em condições controladas.

Com base nesses resultados, os tratamentos T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) e T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>) foram selecionados como os mais eficazes, equilibrando dose aplicada e desempenho microbiológico. Comparações com estudos anteriores reforçam a relevância dos resultados obtidos, considerando especialmente as doses mais baixas e a eficiência alcançada. Assim, os dados fornecem base sólida para a aplicação desses dois tratamentos em sistemas reais, representando um avanço significativo na busca por alternativas não térmicas para a descontaminação de leite.

### 5.3 Avaliação microbiológica das amostras de leite cru irradiadas

A avaliação microbiológica de T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) e T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>), demonstrou que as amostras de leite cru irradiadas apresentaram reduções significativas na carga de microrganismos indicadores de qualidade e segurança higiênico-sanitária, com níveis quantitativos inferiores aos da amostra controle para todos os grupos estudados (Tabela 11), evidenciando que o processo de irradiação UV-C em sistema helicoidal de fluxo contínuo, promovido pelo aparato experimental, foi eficaz na redução da carga microbiana presente nas amostras.

Tabela 11 – Contagem microbiana de mesófilos, *Staphylococcus aureus*, enterobactérias e *E. coli* em amostras de leite cru e submetidas à radiação UV-C.

Amostras	Mesófilos (UFC/mL)	<i>S. aureus</i> * (UFC/mL)	Enterobactérias (UFC/mL)	<i>E. coli</i> (UFC/mL)
C	1,30 x 10 <sup>7</sup> a	2,00 x 10 <sup>4</sup> a	2,60 x 10 <sup>5</sup> a	1,1 x 10 <sup>6</sup> a
T1	5,50 x 10 <sup>5</sup> b	<10 <sup>b</sup>	2,25 x 10 <sup>3</sup> b	1,00 x 10 <sup>3</sup> b
T2	3,39 x 10 <sup>5</sup> c	<10 <sup>b</sup>	1,00 x 10 <sup>3</sup> c	1,00 x 10 <sup>3</sup> b

Fonte: Autor (2025). \*Colônias típicas; C - Amostra controle (não irradiada) / T1 - Tratamento 1, dose UV-C efetiva de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> / T2 - Tratamento 2, dose UV-C efetiva de 9,67 kJ/m<sup>2</sup>. Resultados expressos como média das respectivas repetições.

De maneira geral, ambos os tratamentos testados demonstraram elevada eficácia na redução da carga microbiana das amostras de leite cru, com destaque para o tratamento T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>) apresentou maior eficiência na redução de mesófilos e enterobactérias, mantendo desempenho estatisticamente equivalente ao tratamento T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) nos demais parâmetros avaliados. No entanto, a diferença observada entre T1 e T2, embora estatisticamente significativa para alguns microrganismos, foi inferior a 1 log, o que pode não representar ganho expressivo do ponto de vista microbiológico ou tecnológico (Tabela 11). Assim, considerando que o tratamento T1 já promoveu reduções logarítmicas superiores a 2,0 para os microrganismos mais sensíveis, bem como a completa eliminação de colônias típicas de *Staphylococcus aureus*, a eliminação de *Staphylococcus aureus* (presuntivo) e a expressiva redução de enterobactérias e *Escherichia coli* reforçam a eficácia global de ambos os tratamentos.

### 5.3.1 Contagem microbiana de mesófilos

A aplicação de radiação UV-C em sistema helicoidal de fluxo contínuo foi eficaz na redução da contagem de bactérias mesófilas em leite cru. A amostra controle apresentou média de  $1,30 \times 10^7$  UFC/mL, enquanto os tratamentos T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) e T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>) resultaram em  $5,50 \times 10^5$  UFC/mL e  $3,89 \times 10^5$  UFC/mL, respectivamente. Ambas as reduções demonstraram diferenças estatisticamente significativas quando comparadas à amostra controle e entre si, evidenciando a eficiência progressiva do tratamento com o aumento da dose (Tabela 11).

Makararpong et al. (2024) registraram reduções de aproximadamente 0,4 a 0,6 log UFC/mL, ao tratar leite cru com UV-C em reator de 144 W, nas contagens de mesófilos. O sistema empregado por Makararpong et al. (2024) consistia em um reator anular de película fina, irradiado por quatro lâmpadas de 48 W na frequência UV-C, com exposição máxima de 13,2 segundos sob escoamento laminar, resultando em doses máximas de apenas 2,93 J/L. Além disso, no sistema de Makararpong et al. (2024), o leite foi protegido por um tubo de quartzo com transmitância de 82,35% e mantido a 38,5 °C por meio de um sistema de resfriamento.

Em contraste, o sistema desenvolvido neste estudo aplicou doses significativamente superiores, com a potência útil de UV-C de 18,28 W na frequência UV-C (154 nm), das quais apenas 33% atravessavam efetivamente o tubo de PTFE. Ainda assim, foram obtidas reduções da carga microbiana mais expressivas que os resultados apresentados por Makararpong et al. (2024), sugerindo maior eficiência do sistema helicoidal, possivelmente favorecida pela maior homogeneização do fluido e pela exposição mais intensa e prolongada das células microbianas da matriz láctea à radiação. Esses resultados reforçam o potencial do reator helicoidal como alternativa eficiente aos sistemas convencionais, mesmo sob condições de potência mais moderada e menor transmitância óptica.

Em um sistema semelhante ao empregado no presente estudo, Chen et al. (2024) avaliaram a eficácia da radiação UV-C na redução microbiana de leite cru utilizando um reator espiralado. Nesse sistema, foi observada uma redução logarítmica média de  $3,77 \pm 0,03$  na contagem de bactérias mesófilas aeróbias, evidenciando uma inativação mais expressiva em comparação aos valores obtidos neste trabalho. Os autores utilizaram uma lâmpada UV-C com potência de 27,0 W associada a tubos de polímero PFA com transmitância de 50 % à radiação de 253,7 nm, o que resultou em uma potência efetiva de aproximadamente 13,5 W atingindo o fluido em tratamento.

No sistema desenvolvido neste estudo, embora tenha sido aplicada uma potência útil de UV-C de 18,3 W, a menor transmitância do tubo de PTFE, estimada em 33%, implica que apenas cerca de 6,0 W da radiação incidente alcançaram efetivamente o leite em escoamento. Tal diferença na potência efetivamente entregue ao meio pode justificar, ao menos em parte, as reduções logarítmicas inferiores, observadas, mesmo diante da aplicação de doses superficiais totais mais elevadas. Ressalta-se que, tanto no presente estudo quanto no de Chen et al. (2024), foram utilizadas configurações helicoidais/espirladas, as quais favorecem a formação de vórtices de Dean, favorecendo a mistura e a exposição mais uniforme das células microbianas à radiação UV-C.

A comparação entre os resultados apresentados neste trabalho e os dados reportados por Makararpong et al. (2024) reforçou ainda mais a influência crítica da configuração do sistema, das propriedades ópticas dos materiais e da potência efetiva da radiação UV-C na eficácia da inativação microbiana. Enquanto Makararpong et al. (2024) obtiveram reduções limitadas de 0,4 a 0,6 log UFC/mL com doses máximas de apenas 2,93 J/L em reator de película fina, o presente trabalho e o estudo de Chen et al. demonstraram desempenhos superiores em sistemas de geometria helicoidal, mesmo sob diferentes condições de intensidade, tempo de exposição e transmitância. Esses resultados demonstram a relevância do projeto do reator e da otimização do caminho óptico como determinantes na eficiência dos tratamentos UV-C aplicados a líquidos opacos, como o leite.

### **5.3.2 Contagem de colônias típicas de *Staphylococcus aureus***

A presença de colônias típicas *Staphylococcus aureus* na amostra controle ( $2,0 \times 10^4$  UFC/mL) e sua completa ausência nas amostras irradiadas com UV-C T1 e T2 indicaram a eliminação total ou redução abaixo do limite de detecção laboratorial, representando uma redução logarítmica superior a 4,0 (Tabela 11). Este resultado foi relevante, uma vez que espécies como *Staphylococcus aureus* são patógenos oportunistas associados a toxinfecções alimentares, sendo sua eliminação desejável em qualquer produto alimentício.

Cabe destacar que apesar da dose aplicada no tratamento T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) do leite cru ter sido menor que em T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>), o resultado foi igualmente eficaz na eliminação das colônias típicas desse microrganismo (Tabela 11), o que reforça sua viabilidade como alternativa eficiente em termos de tempo e custo para o controle de microrganismos do gênero *Staphylococcus*.

Makararpong et al. (2024) avaliaram a inativação de *Staphylococcus* coagulase-positiva em leite cru. No tratamento com elevada carga microbiana (HUVC), observou-se uma redução máxima de aproximadamente 0,8 log, caracterizando a atuação do sistema predominantemente como uma barreira ao crescimento, sem evidência de inativação progressiva ao longo do tempo. No tratamento com carga intermediária (MUVC), a exposição à radiação UV-C promoveu uma redução inicial de cerca de 0,5 log na contagem de *Staphylococcus* coagulase-positiva aos 30 minutos, indicando um efeito antimicrobiano imediato. Contudo, essa redução não foi sustentada, e as contagens aumentaram gradualmente, atingindo aproximadamente 3,8 logs após 120 minutos de exposição.

Em contraste, o sistema helicoidal desenvolvido neste estudo promoveu redução logarítmica superior a 4,0 em apenas 15 minutos (900 segundos) (9,67 kJ/m<sup>2</sup>), partindo da carga inicial de  $2,00 \times 10^4$  UFC/mL (~4,3 logs) e atingindo níveis inferiores ao limite de detecção (<10 UFC/mL) para colônias típicas de *Staphylococcus aureus* (Tabela 11). Essa redução foi mais expressiva do que as obtidas por Makararpong et al. (2024), utilizando doses inferiores. Tal desempenho pode ser atribuído ao design hidrodinâmico helicoidal de distribuição do leite no aparato experimental de radiação UV-C, o qual favoreceu a renovação contínua da interface irradiada, proporcionando a mistura eficiente para o tratamento da matriz láctea opaca.

Gadodia et al. (2025), em um sistema de fluxo helicoidal, relataram uma redução de aproximadamente 5 log de *Staphylococcus aureus* após 3 a 4 passagens do leite, a uma vazão de 1 L/h, por um reator UV-C anular em espiral. No presente estudo, a carga inicial de *S. aureus* foi inferior, em torno de 4 log, o que resultou em completa inativação ou em contagens abaixo do limite de detecção do método analítico. Não foram investigadas doses efetivas inferiores a 4,48 kJ/m<sup>2</sup> (T1; 450 s), impossibilitando avaliar se níveis equivalentes de inativação poderiam ser alcançados com menores tempos de exposição e, portanto, menores doses aplicadas, ou, alternativamente, se maiores cargas microbianas iniciais requereriam doses mais elevadas e tempos de tratamento mais prolongados para a obtenção de reduções adicionais em unidades logarítmicas.

### 5.3.3 Contagem microbiana de enterobactérias

As enterobactérias, grupo que inclui microrganismos indicativos de contaminação fecal e de falhas nas boas práticas de fabricação, também apresentaram reduções expressivas em ambos os tratamentos com radiação UV-C. A contagem na amostra controle (C) foi de  $2,60 \times 10^5$  UFC/mL, enquanto as amostras T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) e T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>) registraram  $2,25 \times 10^3$

UFC/mL e  $1,00 \times 10^3$  UFC/mL, respectivamente. Essas reduções corresponderam a aproximadamente 2,06 log para T1 e 2,41 log para T2 (Tabela 11). Assim como observado para os microrganismos mesófilos totais, houve diferença significativa entre os tratamentos, com T2 apresentando maior eficiência na redução da carga microbiana. Esses resultados reforçam a superioridade do tratamento T2, embora o T1 também tenha promovido uma redução superior a 99%, o que indica sua eficácia considerável no controle de microrganismos indicadores de contaminação (Tabela 11).

A Instrução Normativa n.º 76/2018 estabelece que o leite cru resfriado deve ter Contagem Padrão em Placas média trimestral de até 300.000 UFC/mL, com limite máximo de 900.000 UFC/mL antes do processamento. Embora este estudo tenha avaliado *Enterobacteriaceae* e não a CPP total, todas as amostras, inclusive a controle, estão dentro dos limites quantitativos estabelecidos pela legislação brasileira. A presença dessas bactérias indica possíveis falhas de higiene, reforçando a importância de sua redução sempre que possível.

Por outro lado, para o leite pasteurizado, os critérios são significativamente mais rigorosos. A Instrução Normativa n.º 76/2018 determina que, de cinco amostras analisadas, a maioria ( $n = 5$ ,  $c = 2$ ) deve apresentar contagem de *Enterobacteriaceae* inferior a 1 UFC/mL (m), sendo tolerado o limite máximo (M) de 5 UFC/mL em até duas amostras. Neste contexto, apesar da redução significativa de enterobactérias, nenhuma das amostras tratadas (T1 ou T2) atingiu os padrões exigidos para este microrganismo em leite pasteurizado. Isso demonstra que, embora eficaz, o tratamento com radiação UV-C não foi suficiente, isoladamente, para substituir a pasteurização térmica tradicional, nas condições testadas e com a carga microbiana inicial observada ( $2,60 \times 10^5$ ).

Além disso, é importante considerar que a eficácia do tratamento UV-C está diretamente ligada à carga microbiana inicial do alimento. No presente estudo, a carga elevada da amostra controle ( $2,60 \times 10^5$  UFC/mL) dificultou que as reduções logarítmicas alcançadas fossem suficientes para cumprir os critérios microbiológicos exigidos para o leite pasteurizado. Entretanto, se a carga inicial fosse aproximadamente 2,0 ciclos logaritmos menores, ou seja, próxima a  $2,60 \times 10^3$  UFC/mL, as mesmas reduções observadas nos tratamentos UV-C permitiriam alcançar contagens finais compatíveis com os limites legais (menores que 1 UFC/mL para a maioria das amostras, conforme estabelece a IN n.º 76/2018).

Isso indica que, com uma matéria-prima de melhor qualidade microbiológica, o tratamento UV-C tem potencial para ser efetivo como alternativa ou complemento à pasteurização tradicional, garantindo maior segurança microbiológica. Portanto, a combinação

de boas práticas desde a ordenha do leite cru até a aplicação do tratamento UV-C pode ser uma estratégia promissora para melhorar a qualidade e segurança do leite pasteurizado.

Makararpong et al. (2024) avaliaram a inativação de coliformes totais em leite cru utilizando um reator UV-C de película fina com potência de 144 W, operando em fluxo contínuo com tempos de exposição de até 120 minutos. Os dados indicaram que os tempos mostrados nos gráficos correspondem à duração da exposição à radiação UV-C, e não a períodos pós-tratamento. No grupo HUVC (com alta carga microbiana), foi registrada a redução significativa da contagem de coliformes totais aos 60 minutos, estimada em cerca de 1,5 log. No grupo MUVC (carga intermediária), a redução mais expressiva ocorreu aos 30 minutos (~0,7 log), embora tenha havido um leve aumento aos 60 minutos.

Em comparação, o sistema helicoidal deste estudo apresentou desempenho microbiológico superior, mesmo sob menor dose de radiação UV-C. Esse resultado pode estar associado à maior eficiência hidrodinâmica do arranjo helicoidal, que favorece a renovação da interface irradiada e uma mistura mais homogênea, aspecto particularmente relevante em matrizes opacas como o leite.

### **5.3.4 Contagem microbiana de *Escherichia coli***

A *Escherichia coli* é considerada um dos principais indicadores de contaminação fecal. A queda acentuada de  $1,1 \times 10^6$  UFC/mL de *E. coli* no controle para apenas  $1,0 \times 10^3$  UFC/mL nos dois tratamentos representou a redução de aproximadamente 3,04 log. Embora a bactéria ainda tenha sido detectada, a redução foi expressiva, reforçando o potencial do tratamento na inativação de microrganismos possivelmente patogênicos. Nesse caso, não houve diferença significativa entre T1 e T2, indicando que ambos os tratamentos foram igualmente eficazes na redução de *E. coli* (Tabela 11).

Kasahara et al. (2015) investigaram a inativação de *E. coli* em leite de cabra utilizando luz UV-C pulsada aplicada em sistema estático, alcançando reduções de até 6 log com doses variando de 1.300 a 10.000 mJ/cm<sup>2</sup>, o que corresponde a irradiâncias instantâneas entre aproximadamente 12.466 e 25.000 W/m<sup>2</sup>, em tempos muito curtos (1 a 8 segundos). Em contraste, o presente estudo utilizou um sistema helicoidal de fluxo contínuo, promovendo múltiplas exposições ao longo de 6,5 metros de tubo irradiado, com doses efetivas médias entre 4,48 kJ/m<sup>2</sup> e 9,67 kJ/m<sup>2</sup> para T1 e T2, respectivamente. Em termos de irradiância, esses valores são referentes respectivamente à 9,95 e 10,76 W/m<sup>2</sup>.

A diferença metodológica entre os sistemas foi substancial: o método estático com luz pulsada concentra energia em pulsos de alta intensidade, enquanto o sistema helicoidal proporciona exposição contínua e distribuída, favorecendo a mistura e o contato repetido com a radiação ao longo do percurso. Apesar da dose instantânea utilizada no presente estudo ser aproximadamente 99,96% inferior à irradiância de pico reportada por Kasahara et al., o sistema helicoidal pode apresentar menor consumo energético total, dado que utiliza uma lâmpada de baixa potência operando de forma constante, sem a necessidade de pulsos de alta intensidade.

Resultados semelhantes foram observados por GÖK et al. (2021), que relataram uma redução de 4,5 log de *E. coli* DH5 $\alpha$  em leite UHT com diferentes teores de gordura, utilizando um reator de filme fino com elementos guias de fluxo (FGE) e doses de até 3,6 kJ/L. A comparação com esse estudo reforçou que, apesar de diferenças nos sistemas experimentais e nas cepas utilizadas, *E. coli* foi relativamente sensível à radiação UV-C, com bons resultados mesmo em meios com alta turbidez, desde que o aparato seja adequado para maximizar a exposição à radiação.

Em comparação ao estudo de Gautam et al. (2017), que obteve até 5,76 log de redução de *E. coli* em água de coco verde utilizando um reator helicoidal com tubo de 1,6 mm de diâmetro interno e tempo de residência de apenas 14 segundos, o presente sistema alcançou uma redução máxima de 3,04 log em leite cru. Essa menor eficiência pode ser atribuída a diversos fatores, entre eles a maior opacidade e complexidade físico-química do leite cru. Além disso, o material do tubo utilizado neste estudo, PTFE, apresentou transmitância de aproximadamente 33%, inferior à transmitância dos tubos de PFA usados por Gautam et al. (2017), limitando ainda mais a passagem da radiação UV-C.

Embora o número de Reynolds em nosso sistema (587 a 638) seja similar ao do estudo de Gautam et al. (2017) ( $Re = 596,4$ ), indicando regimes de escoamento comparáveis.

O fato de um tubo mais longo (6,5 metros) ter sido empregado no aparato experimento com sistema UV-C helicoidal, operando em regime de recirculação, pode influenciar a dinâmica do fluxo e a exposição do fluido à radiação UV-C. Assim, ainda que os regimes de escoamento sejam semelhantes, fatores como as dimensões do tubo, o tipo de operação (recirculação ou fluxo contínuo) e as propriedades da matriz tratada influenciam diretamente a dose efetiva de radiação recebida pelo fluido e, conseqüentemente, a eficiência de inativação de *E. coli*. Esses fatores, aliados à maior complexidade do leite cru e às propriedades ópticas do material, explicam a redução menor observada no presente estudo, apesar do resultado significativo obtido para uma matriz alimentar mais desafiadora.

Tais resultados reforçam a viabilidade e o potencial do presente sistema como alternativa para redução microbiana não térmica em matrizes lácteas. Não foram encontrados na literatura estudos utilizando reatores helicoidais para o tratamento de leite cru com foco específico na inativação de *Escherichia coli*, o que evidencia o caráter inovador desta abordagem.

A eficácia do tratamento é fortemente influenciada pela carga microbiana inicial. No presente estudo, observou-se uma redução superior a 99,9% na contagem de *E. coli*; contudo, a elevada carga inicial ( $1,1 \times 10^6$  UFC/mL) impediu a completa eliminação do microrganismo. Esse resultado evidencia a importância do monitoramento sistemático da carga microbiana da matéria-prima e da adoção rigorosa de Boas Práticas de Fabricação (BPFs) ao longo da cadeia produtiva, de modo a assegurar níveis iniciais mais baixos de contaminação. Nessas condições, com uma carga microbiana inicial de aproximadamente dois ciclos logarítmicos inferior, o mesmo protocolo de tratamento teria potencial para promover a inativação total da bactéria.

## **5.4 Avaliação físico-química e hidrodinâmica do leite cru irradiado**

### ***5.4.1 Análise do regime de escoamento: Números de Reynolds e Dean***

O aparato experimental operou em regime laminar com vórtices de Dean bem formados em todas as amostras avaliadas - C, T1 e T2 (Tabela 12). Os números de Reynolds variaram entre 587 (T2) e 638 (C e T1), valores que, embora inferiores ao limite clássico para escoamento turbulento ( $Re \approx 2000$ ), se encontram dentro da faixa intermediária apontada por Mansour et al. (2019) como ideal para promover intensificação da mistura em sistemas helicoidais. Segundo os autores, existem duas faixas de Reynolds particularmente eficientes nesse tipo de geometria: uma entre 20–60, relacionada à estabilização e reforço dos vórtices de Dean em fluxo laminar, e outra entre 350–1000, na qual ocorre intensificação da estrutura vorticial e da convecção sem entrada em regime turbulento. Assim, os valores observados no experimento estão próximos da segunda faixa, favorecendo a mistura convectiva durante os processos de irradiação UV-C (WANG; CHANG; LIN, 2021).

Tabela 12 – Parâmetros hidrodinâmicos do aparato experimental para aplicação da radiação UV-C em distribuição helicoidal de leite.

<b>Parâmetros</b>	<b>C</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>Referência de tópico</b>
<b>Número de Reynolds (Re)</b>	638	638	587	<b>4.1.5</b>
<b>Número de Dean (De)</b>	82,4	82,4	75,8	<b>4.1.5</b>
<b>Regime Hidrodinâmico</b>	Laminar com vórtices de Dean bem formados	Laminar com vórtices de Dean bem formados	Laminar com vórtices de Dean bem formados	<b>4.1.5</b>

Fonte: Autor (2025). C - Amostra não tratada, T1 - Tratamento 1, dose UV-C efetiva de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> / T2 - Tratamento 2, dose UV-C efetiva de 9,67 kJ/m<sup>2</sup>.

Embora o número de Dean em T2 (75,8) tenha sido ligeiramente inferior ao das amostras C e T1 (82,4), todos os valores ainda se situam dentro da faixa típica de regime laminar com vórtices de Dean bem desenvolvidos (Tabela 12). Essa condição favoreceu a movimentação radial do fluido, promovendo uma distribuição mais uniforme da radiação UV-C. A formação desses vórtices contribuiu para mitigar os efeitos adversos da turbidez e da alta absorvância de líquidos opacos, como os sucos e, por analogia, o leite, por meio de uma mistura eficiente que reduz zonas de sombra. Dessa forma, mesmo em uma matriz complexa como o leite, os vórtices de Dean tendem a potencializar a eficácia da inativação microbiana (MÜLLER et al., 2011).

#### 5.4.2 Parâmetros físico-químicos avaliados

A avaliação dos parâmetros físico-químicos do leite cru submetido à irradiação UV-C (Tabela 13) demonstrou que, de modo geral, os tratamentos não promoveram alterações significativas nas características expressas na legislação, mantendo-se dentro de padrões compatíveis, com exceção de alguns parâmetros específicos (BRASIL, 2011; BRASIL, 2018a).

A acidez titulável (0,20 g de ácido láctico/100 mL), o índice crioscópico (-0,510 °H), o teor de proteínas (2,77 g/100 g), a matéria gorda (3,6 g/100 g), o extrato seco desengordurado (7,5 g/100 g) e a densidade relativa, medida a 15 °C (1027 kg/m<sup>3</sup>) apresentaram o mesmo valor

para todas as amostras, evidenciando que a aplicação da radiação não interferiu nos parâmetros físico-químicos avaliados.

Tabela 13 – Parâmetros físico-químicos de amostras de leite cru irradiadas com diferentes doses de UV-C e a legislação vigente.

<b>Características físico-químicas</b>	<b>Legislação</b>	<b>C</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>
<b><i>Acidez titulável</i></b> (g de ácido láctico/100mL)	0,14 a 0,18	0,20±0,00 <sup>a</sup>	0,20±0,00 <sup>a</sup>	0,20±0,00 <sup>a</sup>
<b><i>Índice Crioscópico</i></b> (°H)	- 0,550 a - 0,530	-0,510±0,00 <sup>a</sup>	-0,510±0,01 <sup>a</sup>	-0,510±0,00 <sup>a</sup>
<b><i>Proteínas</i></b> (g/100g)	Mínimo 2,9	2,77±0,00 <sup>a</sup>	2,77±0,00 <sup>a</sup>	2,77±0,00 <sup>a</sup>
<b><i>Matéria Gorda</i></b> (g/100g)	Mínimo 3,0	3,6±0,00 <sup>a</sup>	3,6±0,00 <sup>a</sup>	3,6±0,00 <sup>a</sup>
<b><i>Densidade Relativa a</i></b> <b><i>15° C</i></b> (kg/m <sup>3</sup> )	1028 a 1032	1027±0,00 <sup>a</sup>	1027±0,00 <sup>a</sup>	1027±0,00 <sup>a</sup>
<b><i>Extrato seco</i></b> <b><i>desengordurado</i></b> (ESD) (g/100g)	Mínimo 8,4	7,5±0,00 <sup>a</sup>	7,5±0,00 <sup>a</sup>	7,5±0,00 <sup>a</sup>

Fonte: BRASIL, 2011; BRASIL 2018a. C - Amostra controle (não irradiada) / T1 - Tratamento 1, dose UV-C efetiva de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> / T2 - Tratamento 2, dose UV-C efetiva de 9,67 kJ/m<sup>2</sup>. Resultados expressos como média das respectivas repetições ± desvio padrão.

Os resultados físico-químicos idênticos entre si para as amostras C, T1 e T2 indicaram que a dose utilizada em T1 já foi suficiente para preservar a composição do leite. Dessa forma, a aplicação de T2, com maior dose efetiva, não ofereceu vantagens adicionais do ponto de vista físico-químico, podendo ser substituída por T1, nesse contexto.

Embora diversos parâmetros físico-químicos estejam em desacordo com os limites estabelecidos pela legislação brasileira, tais inconformidades foram observadas também na amostra controle e se mantiveram inalteradas após os tratamentos. Portanto, as não conformidades identificadas estão relacionadas à qualidade da matéria-prima e não ao processo de irradiação. Dessa forma, os dados ressaltaram que, embora a UV-C se mostre segura quanto à integridade físico-química do leite, sua aplicação deve estar necessariamente associada ao adequado controle de qualidade da matéria-prima para garantir a conformidade e segurança do produto final.

Esses resultados reforçaram a estabilidade da composição físico-química do leite diante da aplicação da radiação UV-C, indicando que o processamento não provocou degradação ou perda de componentes relevantes, nem tampouco alterou os parâmetros que caracterizam a integridade e qualidade do leite cru.

#### 5.4.3 Potencial hidrogeniônico (pH) e Viscosidade das amostras

Os resultados apresentados na tabela 14 indicaram que a aplicação da radiação UV-C causou redução estatisticamente significativa no valor de pH no tratamento T2 em comparação com a amostra controle e com o tratamento T1 ( $p < 0,05$ ). Os valores observados foram de  $6,79 \pm 0,02$  para a amostra controle,  $6,86 \pm 0,02$  para T1 e  $6,70 \pm 0,05$  para T2.

Tabela 14 – Valores de pH e viscosidade das amostras de leite cru controle e das amostras submetidas à radiação UV-C.

Amostras	pH	Viscosidade (mPa *s)
C	$6,79 \pm 0,02^a$	$7,67 \pm 1,52^a$
T1	$6,86 \pm 0,02^a$	$7,67 \pm 1,15^a$
T2	$6,70 \pm 0,05^b$	$8,33 \pm 1,00^a$

Fonte: Autor (2025). C - Amostra controle (não irradiada) / T1 - Tratamento 1, dose UV-C efetiva de  $4,48 \text{ kJ/m}^2$  / T2 - Tratamento 2, dose UV-C efetiva de  $9,67 \text{ kJ/m}^2$ . Resultados expressos como média das respectivas repetições  $\pm$  desvio padrão ( $p < 0,05$ ).

No estudo de Dasalkar et al. (2024), que utilizou um reator helicoidal para tratamento de leite integral, foi observada redução estatisticamente significativa no pH das amostras após a irradiação com UV-C. Os autores também avaliaram leite de búfala, mas, nesse caso, não houve diferença significativa entre as amostras controle e irradiadas, indicando a possível influência do tipo de leite sobre a resposta ao tratamento.

Resultados semelhantes foram descritos por Kasahara et al. (2015), que relataram redução significativa no pH de leite de cabra submetido à radiação UV-C pulsada em condições de repouso. Os autores sugerem que tal comportamento pode estar associado às características composicionais específicas e à estrutura proteica distinta do leite de cabra, além de possíveis diferenças no sistema de irradiação, particularmente no que se refere à ausência de agitação ou movimentação do fluido durante o processo.

Por outro lado, outros estudos não observaram alterações significativas no pH do leite após tratamento com UV-C. Delorme et al. (2020), Orłowska et al. (2013) e Vladimir et al. (2019) relataram estabilidade nos valores de pH ao irradiar leite bovino em repouso com UV-C pulsada.

De forma semelhante, Chen et al. (2024) não identificou variações significativas no pH de amostras de leite cru tratadas em um reator helicoidal, de configuração comparável ao aparato experimental utilizado no presente estudo. De maneira geral, os resultados apontaram que a manutenção ou alteração do pH após a irradiação UV-C está condicionada a múltiplos fatores, incluindo o tipo de leite, a modalidade de radiação aplicada (contínua ou pulsada), o estado físico do fluido durante o tratamento (em repouso ou em escoamento) e as condições operacionais específicas de cada sistema.

Com relação à viscosidade, os valores observados variaram entre  $7,67 \pm 1,52$  mPa·s (controle) e  $8,33 \pm 1,00$  mPa·s (T2), sem diferenças significativas entre os grupos ( $p > 0,05$ ). Isso indica que o tratamento com radiação UV-C, mesmo sob diferentes tempos de exposição (ou seja, diferentes doses), não causou alterações mensuráveis na viscosidade do leite cru. Essa ausência de efeito também foi observada por Yu et al. (2022) e Chen et al. (2024), em estudos similares com irradiação UV-C de leite cru em reatores helicoidais.

#### ***5.4.4 Colorimetria das amostras***

A aplicação de radiação UV-C em leite cru promoveu alterações significativas nas coordenadas de cor  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  (Tabela 15). A coordenada  $L^*$ , responsável pela luminosidade da amostra, não mostrou diferença estatística significativa entre o controle e os tratamentos T1 e T2 ( $p > 0,05$ ). Esses dados demonstraram que a aplicação da radiação UV-C, mesmo em doses maiores, não comprometeu a claridade do leite, preservando seu aspecto visual original.

Tabela 15 – Valores das coordenadas de cor  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  das amostras de leite cru controle e as submetidas à radiação UV-C.

Amostras	C	T1	T2
$L^*$	$45,42 \pm 0,48^a$	$46,63 \pm 0,48^a$	$48,39 \pm 1,35^a$
$a^*$	$-2,19 \pm 0,10^a$	$-1,62 \pm 0,11^b$	$-1,79 \pm 0,17^b$
$b^*$	$2,67 \pm 0,18^a$	$2,01 \pm 0,13^{ab}$	$1,95 \pm 0,41^b$

Fonte: Autor (2025). C - Amostra controle (não irradiada) / T1 - Tratamento 1, dose UV-C efetiva de  $4,48 \text{ kJ/m}^2$  / T2 - Tratamento 2, dose UV-C efetiva de  $9,67 \text{ kJ/m}^2$ . Resultados expressos como média das respectivas repetições  $\pm$  desvio padrão ( $p < 0,05$ ).

A preservação da coordenada de cor  $L^*$  não foi observada em estudos semelhantes em leite. Chen et al. (2024) relataram redução significativa na luminosidade ( $L^*$ ) de leite cru tratado em reator helicoidal, associado-a à fotooxidação de lipídios e proteínas. Já Wang et al. (2024a) observaram aumento significativo nesta coordenada com o uso de um reator anular de película fina, atribuído a mudanças físicas na estrutura coloidal. A estabilidade da  $L^*$  observada neste trabalho, independentemente da dose de exposição, reforçou a eficácia do sistema experimental adotado na preservação da aparência do leite cru.

Quanto à coordenada  $a^*$ , relacionada à tonalidade entre o verde (valores negativos) e o vermelho (valores positivos), foi observada diferença estatística significativa entre o controle e os tratamentos de radiação UV-C. Ambos os tratamentos e a amostra controle apresentaram valores na região do eixo negativo (que tende ao verde), no entanto, não houve diferença significativa entre os tratamentos T1 e T2, sugerindo que o efeito da radiação UV-C sobre esse parâmetro não se intensificou com o aumento do tempo de exposição para as doses trabalhadas.

Esses resultados foram coerentes aos de Dasalkar et al. (2024), que também relataram aumento da coordenada  $a^*$  em amostras irradiadas com UV-C em reator helicoidal e de Wang et al. (2024a), que observaram comportamento semelhante em reator de película fina, associando a alteração a mudanças na dispersão de proteínas e lipídios. Por outro lado, Chen et al. (2024) identificou uma redução nos valores de  $a^*$  após o tratamento, efeito atribuído à fotooxidação de componentes estruturais, que poderia intensificar a tonalidade esverdeada.

Essas divergências entre os estudos indicaram que, embora o tipo de reator influencie a resposta óptica do sistema, fatores como composição do leite, intensidade da radiação e características físico-químicas da matriz também desempenham papel relevante. A consistência dos resultados entre os tratamentos aplicados no presente estudo evidenciou que a

alteração da tonalidade esverdeada ocorreu de forma controlada e limitada, sem se agravar com exposição a doses maiores.

No caso da coordenada  $b^*$ , que expressa a tonalidade entre o amarelo e o azul, os dados mostraram a redução progressiva nos valores médios com o aumento da exposição a dose de radiação UV-C. O tratamento T2 apresentou diferença significativa ( $p > 0,05$ ) em relação ao controle, enquanto o T1 não diferiu significativamente do controle e do T2, situando-se em uma posição intermediária. Isso sugere que a redução da tonalidade amarelada torna-se mais pronunciada apenas em tempos de exposição mais longos, reforçando a importância da dosimetria no controle de atributos visuais.

Esse padrão foi consistente com os resultados de Wang et al. (2024a), que também relataram diminuição na coordenada  $b^*$ , associando a alteração à reorganização dos componentes coloidais, como micelas de caseína em suspensão e os glóbulos de gordura em emulsão, sob efeito da radiação UV-C. Chen et al. (2024), por outro lado, observaram um aumento nos valores de  $b^*$ , enquanto Dasalkar et al. (2024) relataram comportamento semelhante ao verificado na coordenada  $a^*$ , com aumento de  $b^*$ , embora com justificativas semelhantes baseadas na interação luz-matéria.

Mesmo com variações estatísticas, as mudanças observadas foram de baixa magnitude, o que indica que, do ponto de vista sensorial, a aparência visual do leite provavelmente não será alterada de forma perceptível ao consumidor. Ainda assim, destaca-se a necessidade de monitoramento desses parâmetros em formulações finais ou aplicações industriais, especialmente quando atributos visuais são críticos para a aceitação do produto.

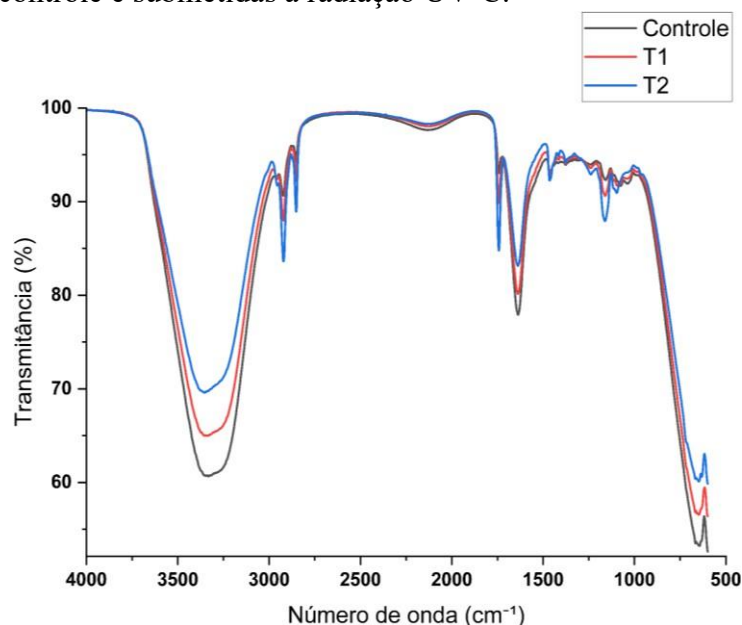
## 5.5 Espectroscopia de Infravermelho (FT-IR)

Os Gráficos 2 e 3 apresentaram, respectivamente, os espectros de transmitância das amostras de leite líquido e de leite liofilizado submetidas aos tratamentos: controle (sem irradiação), T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) e T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>). Os espectros foram registrados na faixa de comprimento de onda entre 4000 e 500 cm<sup>-1</sup>, abrangendo as principais bandas de absorção associadas aos grupos funcionais presentes nos componentes do leite, como proteínas, lipídios e carboidratos.

Além do espectro completo, foram ampliadas duas regiões de interesse específicas: a primeira, no comprimento de onda entre 1150 e 800 cm<sup>-1</sup>, evidencia bandas associadas às vibrações dos grupos C–O e C–C da lactose, possibilitando a identificação de modificações estruturais nesse açúcar; a segunda, entre 1700 e 1200 cm<sup>-1</sup>, destaca bandas atribuídas aos

estiramentos de ligações C=O, C–H e às ligações peptídicas (amidas I e II), relacionadas principalmente aos componentes proteicos e lipídicos (DU; 2024).

Gráfico 2 – Espectros de absorção no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) de amostras de leite líquido controle e submetidas à radiação UV-C.

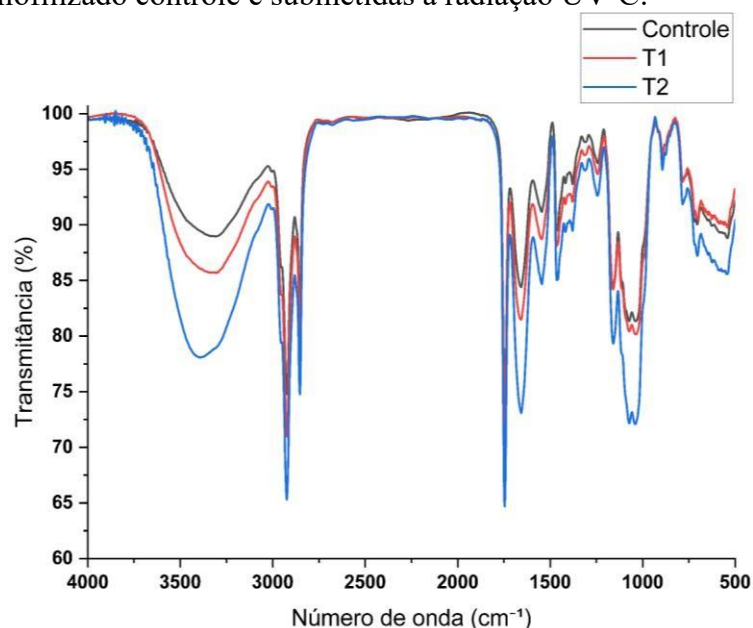


Fonte: Autor (2025). Espectros FTIR das amostras de leite: Controle - Amostra controle (não irradiada) / T1 - Tratamento 1, dose UV-C efetiva de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> / T2 - Tratamento 2, dose UV-C efetiva de 9,67 kJ/m<sup>2</sup>.

A análise comparativa dos espectros FTIR das amostras de leite nos estados líquido e liofilizado (Gráficos 2 e 3) revelou diferenças significativas relacionadas à forma física da matriz e à sensibilidade dos constituintes químicos às alterações induzidas pela radiação UV-C. Ambas as amostras apresentaram perfis espectrais típicos do leite, com bandas atribuídas à lactose, proteínas e lipídios, conforme descrito por De Freitas et al. (2021), Carbonaro e Nucara (2010) e Lei et al. (2010). No entanto, a liofilização, realizada após o tratamento com UV-C, melhorou a resolução espectral ao eliminar a interferência da água, facilitando a detecção de modificações moleculares induzidas pela radiação UV-C.

Na região de comprimento de onda de 800 a 1150 cm<sup>-1</sup>, relacionada aos grupos C–O, C–C e C–H da lactose, as amostras líquidas apresentaram pequenas variações na transmitância entre os tratamentos, com discreta redução especialmente em T2. Essa baixa intensidade de mudanças pode ser atribuída à presença da água, que absorve fortemente na região e pode mascarar alterações sutis, como relatado por Du (2024), Lei et al. (2010) e Conceição et al. (2019).

Gráfico 3 – Espectros de absorção no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) de amostras de leite liofilizado controle e submetidas à radiação UV-C.



Fonte: Autor (2025). Espectros FTIR das amostras de leite liofilizado: Controle - Amostra controle (não irradiada) / T1 - Tratamento 1, dose UV-C efetiva de 4,48 kJ/m<sup>2</sup> / T2 - Tratamento 2, dose UV-C efetiva de 9,67 kJ/m<sup>2</sup>

Após a liofilização, a ausência de água permitiu o aumento significativo na definição das bandas, evidenciando alterações estruturais mais nítidas na lactose, principalmente no tratamento T2. Isso reforçou a relevância da faixa espectral de 900–1200 cm<sup>-1</sup> para a análise de açúcares em matrizes desidratadas, conforme apontado por Conceição et al. (2019) e De Freitas et al. (2021).

As regiões de amida I, II e III (1634, 1545 e 1248 cm<sup>-1</sup>), correspondentes às proteínas, também mostraram alterações mais evidentes nas amostras liofilizadas. Enquanto no leite líquido as variações na transmitância foram discretas, no liofilizado houve diminuição mais pronunciada, sugerindo mudanças conformacionais decorrentes da irradiação UV-C.

A maior clareza na detecção dessas alterações na forma seca se deve à redução das interferências da água, que no estado líquido dificulta a visualização de mudanças sutis na estrutura proteica. Estudos anteriores indicaram que vibrações associadas ao estiramento C=O e flexão N-H são particularmente sensíveis a desnaturações e reorganizações conformacionais nas cadeias polipeptídicas (Du, 2024; Carbonaro; Nucara, 2010; Jaiswal et al., 2015).

Em relação às bandas lipídicas, identificadas em 1745, 2851 e 2914 cm<sup>-1</sup>, as amostras liofilizadas revelaram um aumento na intensidade das mesmas após o tratamento UV-C, sugerindo maior suscetibilidade dos lipídios a processos oxidativos na ausência da proteção

proporcionada pela água. No leite líquido, essas variações foram quase imperceptíveis, reforçando o papel da matriz aquosa como um fator estabilizador contra modificações provocadas pela radiação (Conceição et al., 2019). Esses resultados são consistentes com os resultados de Ye et al. (2017), que destacaram bandas intensas correspondentes a lipídios e proteínas em leite em pó, indicando a importância do estado físico da amostra para a análise espectral.

Ainda, a banda entre 3200–3400  $\text{cm}^{-1}$ , relacionada ao estiramento das ligações O–H e N–H, apresentou perfil largo e suave nas amostras líquidas, reflexo da alta concentração de água e das interações de hidrogênio que mascaram alterações moleculares. Após a liofilização, essa banda tornou-se mais estreita e bem definida, evidenciando as modificações estruturais causadas pela radiação UV-C, sem a interferência da água (Ottenhof; Macnaughtan; Farhat, 2003).

Esses resultados convergem com os resultados de Mota et al. (2023), que identificaram a faixa entre 3200 e 2900  $\text{cm}^{-1}$  como altamente correlacionada às propriedades estruturais e funcionais das proteínas do leite, com destaque para comprimentos de onda específicos (3245 e 3184  $\text{cm}^{-1}$ ) associados à frações proteicas importantes. A intensificação dos sinais em T2 sugere rearranjos nas ligações de hidrogênio e na conformação proteica, induzidos pela radiação UV-C, que foram melhor detectados após a remoção da água pela liofilização.

Dessa forma, a combinação dos dados espectrais do presente estudo com as evidências de Mota et al. (2023) fortalece a conclusão de que a radiação UV-C promoveu alterações conformacionais na matriz proteica do leite e em outras biomoléculas, as quais foram melhor identificadas quando a amostra foi analisada em estado liofilizado. Assim, a liofilização, ao eliminar a água, melhorou a sensibilidade analítica da espectroscopia ATR-FTIR para a investigação de modificações moleculares induzidas pelo tratamento, enquanto o leite líquido manteve a estrutura nativa, mas com menor capacidade de revelar mudanças sutis devido à interferência da umidade.

## 6 CONCLUSÃO

O aparato experimental com sistema de circulação helicoidal desenvolvido foi capaz de reduzir a carga microbiana de *E.coli* inoculada no leite UHT em 3,0 ciclos logaritmos, apontando os tratamentos T1 (4,48 kJ/m<sup>2</sup>) e T2 (9,67 kJ/m<sup>2</sup>) como os mais promissores para serem aplicados no leite cru.

O monitoramento da temperatura do processo mostra que o leite manteve menor temperatura em T1 (18,80 ± 3,92 °C), indicando o melhor controle térmico, enquanto T2 (24,57 ± 7,80 °C) permaneceu próximo de 25 °C e T3 apresentou maior aquecimento (28,23 ± 7,64 °C).

A avaliação da transmitância do tubo condutor utilizado (PTFE) possibilitou a quantificação da dose efetivamente recebida pela amostra, contribuindo para o rigor do processo e preenchendo lacunas metodológicas observadas em estudos anteriores. Os dados hidrodinâmicos indicam um regime laminar com vórtices de Dean, favorecendo a homogeneização do fluido e a exposição uniforme do leite à radiação UV-C. Esse comportamento contribui para superar limitações impostas pela turbidez natural da matriz, potencializando a eficácia da inativação microbiana.

A aplicação da radiação UV-C no leite cru demonstra reduções expressivas em todos os grupos bacterianos analisados, com destaque para a eliminação total de colônias típicas de *S. aureus* (superior a 4 log), indicando que os tratamentos foram eficazes. O tratamento T2 apresentou maior desempenho na redução de mesófilos e enterobactérias; no entanto, considerando que a diferença em relação ao T1 foi inferior a 1 log, este se mostra mais vantajoso por equilibrar eficácia, tempo de exposição e custo operacional.

A avaliação físico-química das amostras tratadas revela que os tratamentos não provocam alterações significativas nos parâmetros regulamentados, mantendo o leite dentro dos padrões exigidos pela legislação vigente. Alterações observadas no pH, nas coordenadas de cor e em aspectos estruturais das biomoléculas, em estado liofilizado parecem ser proporcionais à dose aplicada.

## REFERÊNCIAS

- ABLV (Associação Brasileira de Leite Longa Vida). *O leite na história da humanidade*. São Paulo: ABLV, 2018. Disponível em: <https://ablv.org.br/wp-content/uploads/2020/10/O-Leite-na-Historia-da-Humanidade.pdf>. Acesso em: 20 maio 2024.
- ALSAEDI, A. W. M. *et al.* Non-thermal pasteurization of milk by elongated electrode moderate electrical field: chemical and sensory analysis during cold storage and shelf-life determination. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Amsterdam, v. 94, p. 103647, 2024.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 18. ed. Arlington: AOAC, 2011.
- APHA (American Public Health Association). *Compendium of methods for the microbiological examination of foods*. Washington: APHA, 2015.
- ATIK, A.; GUMUS, T. The effect of different doses of UV-C treatment on microbiological quality of bovine milk. *LWT*, Amsterdam, v. 136, p. 110322, 2021.
- AYOU, D. S.; CORONAS, A. Comparative analysis of solar-powered heat pump systems for decarbonization of process heating and cooling applications: case of milk pasteurization. *Thermal Science and Engineering Progress*, Amsterdam, v. 53, p. 102774, 2024.
- BANDLA, S. *et al.* Impact of UV-C processing of raw cow milk treated in a continuous flow coiled tube ultraviolet reactor. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Beijing, v. 14, n. 2, p. 86-93, 2012.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Instrução normativa nº 62, de 29 de dezembro de 2011*. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2011.
- BRASIL. *Instrução normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018*. Regulamentos técnicos que fixam a identidade e as características de qualidade que devem apresentar o leite cru refrigerado, o leite pasteurizado e o leite pasteurizado tipo A. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 30 nov. 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Instrução normativa nº 77, de 26 de novembro de 2018*. Estabelece os critérios e procedimentos para a produção, acondicionamento, conservação, transporte, seleção e recepção do leite cru em estabelecimentos registrados no Serviço de Inspeção Oficial. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 30 nov. 2018.
- BRASIL. Ministério da Economia; Controladoria-Geral da União. *Instrução normativa conjunta nº 55, de 20 de julho de 2020*. Altera a Instrução Normativa Conjunta nº 1, de 12 de janeiro de 2018, que dispõe sobre os procedimentos aplicáveis à Solicitação de Simplificação de que trata o Decreto nº 9.094, de 17 de julho de 2017. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 21 jul. 2020.
- CABALLERO, B.; TRUGO, L.; FINGLAS, P. (ed.). *Encyclopedia of food sciences and nutrition*. 2. ed. London: Academic Press, 2003.
- CARBONARO, M.; NUCARA, A. Secondary structure of food proteins by Fourier transform

spectroscopy in the mid-infrared region. *Amino Acids*, Vienna, v. 38, n. 3, p. 679-690, 2010.

CARVALHO, G. R.; CARVALHO, C. O. Questões para aumentar a competitividade do leite brasileiro. *AgroANALYSIS*, Rio de Janeiro, v. 43, n. 6, p. 16-18, 2023.

CERIBELI, C. *et al.* Impact of non-thermal pasteurization technologies on vitamin B12 content in milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Amsterdam, v. 84, p. 103303, 2023.

CHEN, J. *et al.* Comparative study on microbiological, physicochemical and nutritional properties of whole cow milk by thermal and non-thermal processing technologies. *Food Bioscience*, Amsterdam, v. 59, p. 104012, 2024.

CHOUDHARY, R. *et al.* Performance of coiled tube ultraviolet reactors to inactivate *Escherichia coli* W1485 and *Bacillus cereus* endospores in raw cow milk and commercially processed skimmed cow milk. *Journal of Food Engineering*, Amsterdam, v. 107, n. 1, p. 14-20, 2011.

CONCEIÇÃO, D. G. *et al.* Use of FTIR-ATR spectroscopy combined with multivariate analysis as a screening tool to identify adulterants in raw milk. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 780-785, 2019.

CRUZ, G. A. Caracterização de queijo de coalho processado com culturas lácticas endógenas e substituto de gordura. 2016. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/21985/1/2016\\_dis\\_gacruz.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/21985/1/2016_dis_gacruz.pdf). Acesso em: 11 maio 2024.

DASALKAR, A. H. *et al.* Impact of UV-C treatment on the inactivation of microbes and amino acid composition in cow milk and buffalo milk: a comparative study. *International Dairy Journal*, Amsterdam, p. 105979, 2024.

DU, L. New insights into raw milk adulterated with milk powder identification: ATR-FTIR spectroscopic fingerprints combined with machine learning and feature selection approaches. *Journal of Food Composition and Analysis*, Amsterdam, v. 133, p. 106443, 2024

DELORME, M. M. *et al.* Ultraviolet radiation: an interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. *Trends in Food Science & Technology*, Amsterdam, v. 102, p. 146-154, 2020.

DESHWAL, G. K.; TIWARI, S.; KADYAN, S. Applications of emerging processing technologies for quality and safety enhancement of non-bovine milk and milk products. *LWT*, Amsterdam, v. 149, p. 111845, 2021.

DIAS, F. G. B. Determinação de propriedades biológicas e prospecção fitoquímica dos extratos das folhas de *Physalis angulata* L., silvestre e cultivada. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/50773/3/dis\\_2019\\_fgbdias.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/50773/3/dis_2019_fgbdias.pdf). Acesso em: 11 maio 2024.

DIAS, I. S. Desmistificação dos efeitos inflamatórios do consumo do leite de vaca: revisão de literatura. 2023. 42 f. TCC (Medicina Veterinária) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/28981>.

Acesso em: 11 maio 2024.

EFSA (European Food Safety Authority). NDA Panel (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies). Scientific opinion on the safety of UV-treated milk as a novel food pursuant to Regulation (EC) n° 258/97. *EFSA Journal*, Parma, v. 14, n. 1, p. 4370, 2016.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Embrapa lança hackathon para aquicultura. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/46670989/embrapa-lanca-hackathon-para-aquicultura>. Acesso em: 20 maio 2024.

FENG, M. *et al.* Effects of ultraviolet-C treatment in Teflon®-coil on microbial populations and physico-chemical characteristics of watermelon juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Amsterdam, v. 19, p. 133-139, 2013.

FERREIRA, C. S. R. *et al.* Optimized application of UV-C radiation in human milk: combined effects on microbiological control of total coliforms and *Lactobacillus* spp., and the quality of fatty acids and minerals. *Journal of Food Composition and Analysis*, Amsterdam, v. 141, p. 107332, 2025.

FREITAS, A. G. M. *et al.* Infrared spectroscopy combined with random forest to determine tylosin residues in powdered milk. *Food Chemistry*, Amsterdam, v. 365, p. 130477, 2021.

GADODIA, V. *et al.* Assessing the influence of far UV-C (222 nm) and UV-C (254 nm) treatment on the physicochemical and microbial properties of milk in an annular flow reactor. *AIP Advances*, Melville, v. 15, n. 2, p. 025xxx, 2025.

GAUTAM, D. *et al.* Nonthermal pasteurization of tender coconut water using a continuous flow coiled UV reactor. *LWT – Food Science and Technology*, Amsterdam, v. 83, p. 127-131, 2017.

GÖK, S. B. *et al.* Inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in milk by a thin film UV-C reactor modified with flow guiding elements (FGE). *International Journal of Food Microbiology*, Amsterdam, v. 343, p. 109105, 2021..

GONÇALVES, L. M.; MONTEBELLO, A. E. S.; SANTOS, J. A. Cadeia produtiva no Brasil: competitividade, sustentabilidade e políticas públicas. *Revista Gestão e Secretariado (GeSec)*, São Paulo, v. 14, n. 5, p. 7765-7786, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i5>

GOPISETTY, V. V. S. *et al.* Impact of UV-C irradiation on the quality, safety, and cytotoxicity of cranberry-flavored water using a novel continuous flow UV system. *LWT*, Amsterdam, v. 95, p. 230-239, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.042>.

- GUAMÁN-LOZADA, D. F. *et al.* Effect of milk film thickness on the efficiency of UVC radiated sterilization of raw cow's milk. *International Journal of Food Properties*, Abingdon, v. 26, n. 1, p. 1497-1505, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2220553>.
- GUNTER-WARD, D. M. *et al.* Efficacy of ultraviolet (UV-C) light in reducing foodborne pathogens and model viruses in skim milk. *Journal of Food Processing and Preservation*, Hoboken, v. 42, n. 2, p. e13485, 2018.
- HIRT, B. *et al.* Improvement of an annular thin film UV-C reactor by fluid guiding elements. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Amsterdam, v. 77, p. 102988, 2022.
- IAL (Instituto Adolfo Lutz). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. 1. ed. digital. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p. Disponível em: [http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016\\_3\\_19/analisedealimentosial\\_2008.pdf](http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016_3_19/analisedealimentosial_2008.pdf). Acesso em: 11 maio 2024.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Pesquisa pecuária municipal 2020*. Rio de Janeiro, v. 48, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=784>. Acesso em: 11 jun. 2024.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Pesquisa trimestral do leite*. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9209-pesquisa-trimestral-do-leite.html?=&t=series-historicas>. Acesso em: 11 jun. 2024
- JAISWAL, P. *et al.* Detection and quantification of soymilk in cow–buffalo milk using Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared spectroscopy (ATR–FTIR). *Food Chemistry*, Amsterdam, v. 168, n. 1, p. 41-47, 2015.
- JUNQUA, R.; VINSONNEAU, E.; GHIDOSI, R. Microbial stabilization of grape musts and wines using coiled UV-C reactor. *OENO One*, Bordeaux, v. 54, n. 1, p. 109-121, 2020.
- KASAHARA, I.; CARRASCO, V.; AGUILAR, L. Inactivation of *Escherichia coli* in goat milk using pulsed ultraviolet light. *Journal of Food Engineering*, Amsterdam, v. 152, p. 43-49, 2015.
- KEKLIK, N. M. *et al.* Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* O157:H7 on fresh kashar cheese with pulsed ultraviolet light. *Food Science and Technology International*, London, v. 25, n. 8, p. 680-691, 2019.
- KOUTCHMA, T.; PARISI, B.; PATAZCA, E. Validation of UV coiled tube reactor for fresh juices. *Journal of Environmental Engineering and Science*, Ottawa, v. 6, n. 3, p. 319-328, 2007.
- KOUTCHMA, T. *Ultraviolet light in food technology: principles and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- LANA, M.; BERNARDO, H.; RATTES, A. Estruturação do ambiente de inovação da cadeia produtiva do leite. *Revista Gestão e Desenvolvimento*, Novo Hamburgo, v. 21, n. 1, p. 3-27, 2024.

- LEMOS, J. J. S. *et al.* Interação entre as instabilidades espacial e temporal da pluviometria na produção de leite no Ceará. *Revista de Economia e Agronegócio*, Viçosa, v. 20, n. 1, p. 1-22, 2022.
- MAHMOOD, W.; ZHU, Z.; CHEN, X.; ZHANG, Z. CFD simulation of liquid food flow in a coiled tube UVC reactor. *Journal of Food Engineering*, Amsterdam, v. 330, p. 111180, 2023.
- M AKARARPONG, D. *et al.* Enhancing raw bovine milk quality using ultraviolet-C (UV-C) irradiation: a microbial and lipid peroxidation study. *Food Science of Animal Resources*, Suwon, v. 44, n. 2, p. 372, 2024.
- MANDAL, R.; PRATAP-SINGH, A. Characterization of continuous-flow pulsed UV light reactors for processing of liquid foods in annular tube and coiled tube configurations using actinometry and computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, Amsterdam, v. 304, p. 110590, 2021.
- MANSOUR, M. *et al.* Generally-valid optimal Reynolds and Dean numbers for efficient liquid-liquid mixing in helical pipes. *Chemical Engineering Science*, Amsterdam, v. 201, p. 382-385, 2019.
- MAPA (Ministério da Agricultura e Pecuária). Valor bruto da produção agropecuária é de R\$ 1,216 trilhão (soja, milho e cana-de-açúcar puxam o VBP). Coordenação-Geral de Políticas Públicas (CGPOP). 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/valor-bruto-da-producao-de-2023-e-projetado-em-r-1-2-trilhao-com-crescimento-de-4-7/NotaCGPOP202311VBP2.pdf>. Acesso em: 23 maio 2024.
- MOGHADDAM, S.; GHOMSHAHI, S. CFD simulation of liquid food flow in a coiled tube UVC reactor. *Food and Bioproducts Processing*, Oxford, v. 146, p. 1-15, 2024.
- MOTA, L. F. M. *et al.* Predicting milk protein fractions using infrared spectroscopy and a gradient boosting machine for breeding purposes in Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*, Champaign, v. 106, n. 3, p. 1853-1873, 2023.
- MÜLLER, A. *et al.* UV-C treatment of juices to inactivate microorganisms using Dean vortex technology. *Journal of Food Engineering*, Amsterdam, v. 107, n. 2, p. 268-275, 2011.
- NETO, O. L. S.; MARQUESAN, F. F. S. As racionalidades que permeiam a bovinocultura de leite no semiárido cearense. *Revista Agropecuária e Ambiental*, Maringá, v. 13, n. 4, p. 1303-1321, 2020.
- OLIVEIRA, M. M. *et al.* Avaliação econômica de uma propriedade de produção de leite em Limoeiro do Norte, Ceará. *ABCustos*, São Leopoldo, v. 17, n. 2, p. 102-128, 2022.
- ORLOWSKA, M. *et al.* Continuous and pulsed ultraviolet light for nonthermal treatment of liquid foods. Part 1: effects on quality of fructose solution, apple juice, and milk. *Food and Bioprocess Technology*, New York, v. 6, p. 1580-1592, 2013.
- OTTENHOF, M.; MACNAUGHTAN, W.; FARHAT, I. A. FTIR study of state and phase transitions of low moisture sucrose and lactose. *Carbohydrate Research*, Amsterdam, v. 338, n. 21, p. 2195-2202, 2003.

PAES, C. S.; GÓES, G. B.; CRISTINO, F. A. C.; CONRADO, J. A. A. Caracterização dos sistemas de produção de leite bovino em um município no semiárido brasileiro. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, v. 22, n. 2, p. 312-320, 2023.

PAIVA, E. C.; CAMPOS, K. C. Índice de sustentabilidade da produção da pecuária leiteira nas mesorregiões do Brasil. *Economia & Região*, Londrina, v. 12, n. 1, p. 48-73, 2024.

PAIVA, E. C.; LEMOS, J. L. S.; CAMPOS, R. T. Previsões para a produção de leite sob instabilidade pluviométrica no Ceará no período de 1974 a 2019. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 60, e235192, 2021.

PEGU, K.; ARYA, S. S. Non-thermal processing of milk: principles, mechanisms and effect on milk components. *Journal of Agriculture and Food Research*, Amsterdam, v. 14, p. 100730, 2023

PENDYALA, B. *et al.* Inactivation of *Bacillus cereus* spores in whole milk and almond milk by serpentine path coiled tube UV-C system: numerical simulation of flow field, lipid peroxidation and volatiles analysis. *Food Research International*, Amsterdam, v. 160, p. 111652, 2022.

PIHEN, C. *et al.* Performance of UV-LED and UV-C treatments for the inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922 in food model solutions: influence of optical and physical sample characteristics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Amsterdam, v. 85, p. 103314, 2023.

PRANAVI, K. S. *et al.* Recent advancements of light-emitting diodes in dairy industries. *Trends in Food Science & Emerging Technologies*, Amsterdam, v. 160, p. 105018, 2025.

ROCHA, C. S. *et al.* Emerging technologies in food processing: impacts on sensory characteristics and consumer perception. *Current Opinion in Food Science*, Amsterdam, v. 47, p. 100892, 2022.

SCHÜTZ, K. E. *et al.* Effects of changing milking and feeding times on the behaviour, body temperature, respiration rate and milk production of dairy cows on pasture. *Applied Animal Behaviour Science*, Amsterdam, v. 261, p. 105895, 2023.

SORO, A. B. *et al.* The efficiency of UV light-emitting diodes (UV-LED) in decontaminating *Campylobacter* and *Salmonella* and natural microbiota in chicken breast, compared to a UV pilot-plant scale device. *Food Microbiology*, Amsterdam, v. 116, p. 104365, 2023

TAKI, K. *et al.* Non-thermal inactivation of *Escherichia coli* in milk using a Venturi tube reactor and liquid-phase plasma: a parametric optimization study. *International Dairy Journal*, Amsterdam, v. 167, p. 106269, 2025.

UGART, S. D. M. Atividade antimicrobiana da cobertura comestível de quitosana adicionada com trans-cinamaldeído sobre *Escherichia coli* e *Listeria innocua* em melão Cantaloupe minimamente processado. 2012. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

VLADIMIR, K. *et al.* Changes in physico-chemical properties of milk under ultraviolet radiation. *Foods and Raw Materials*, Kemerovo, v. 7, n. 1, p. 161-167, 2019.

- WANG, C. P.; CHANG, C. S.; LIN, W. C. Efficiency improvement of a flow-through water disinfection reactor using UV-C light emitting diodes. *Journal of Water Process Engineering*, Amsterdam, v. 40, p. 101819, 2021.
- WANG, X. *et al.* Photon-phonon coupling cold sterilization technology for milk preservation. *Food Control*, Amsterdam, v. 157, p. 110169, 2024a.
- WANG, X. *et al.* Thermal inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* in milk under isothermal and dynamic conditions. *Food Research International*, Amsterdam, v. 179, p. 114010, 2024b.
- WHITE, F. M. *Fluid mechanics*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- XIE, Y. *et al.* A metabolomics approach for monitoring thermal processing temperature of bovine milk using ultra-performance liquid chromatography tandem Q-Exactive mass spectrometry and multivariate data analysis. *Journal of Future Foods*, Amsterdam, v. 4, n. 1, p. 83-90, 2024.
- YE, M. P. *et al.* Effects of heating on the secondary structure of proteins in milk powders using mid-infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, Champaign, v. 100, n. 1, p. 89-95, 2017.
- YU, T. *et al.* Comparison of the effects of high hydrostatic pressure and pasteurization on quality of milk during storage. *Foods*, Basel, v. 11, n. 18.