

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANEAMENTO

**ISABELA MOREIRA BESSA**

**Avaliação de Reator de LEDs UVA conjugado com tecido revestido  
com prata para a desinfecção de água de consumo**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos –SP

2022

(Página deixada em branco)

**ISABELA MOREIRA BESSA**

**Avaliação de Reator de LEDs UVA conjugado com tecido revestido  
com prata para a desinfecção de água de consumo**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos, da Universidade de São Paulo  
como parte dos requisitos para obtenção do título  
de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Hidráulica e  
Saneamento

Orientadora: Prof. Dra. Lyda Patrícia Sabogal Paz

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos - SP

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M557a Moreira Bessa, Isabela  
Avaliação de reator de LEDs UVA conjugado com  
tecido revestido com prata para a desinfecção de água  
de consumo / Isabela Moreira Bessa; orientador Lyda  
Patrícia Sabogal Paz . São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e  
Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2022.

1. desinfecção de água. 2. radiação  
ultravioleta. 3. LEDs UVA. 4. LEDs UVC. 5. Tecidos  
revestidos com prata. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

---

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ISABELA MOREIRA BESSA**.

Título da dissertação: "Avaliação de reator de leds uva conjugado com tecido revestido com prata para a desinfecção de água de consumo".

Data da defesa: 18/11/2022.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Profa. Associada **Lyda Patricia Sabogal Paz**  
**(Orientadora)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovada

Profa. Dra. **Denise Conceição de Gois Santos Michelin**  
(Universidade Federal de Sergipe/UFS)

Aprovada

Prof. Dr. **Rapahel Corrêa Medeiros**  
(Universidade Federal de Santa Maria/UFSM)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:  
Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedico este trabalho à:

Meus pais Luiz Alberto e Joceliana,

Meu noivo Mendel,

E a minha querida avó Therezinha.



## AGRADECIMENTOS

À Deus por sua misericórdia e por me dar forças e condições mentais para enfrentar os desafios;

Aos meus pais, Beto e Célia, por todo amor e incentivo depositado;

Ao Mendel por todo apoio dado, por me fazer acreditar que é possível vencer os obstáculos.

À Professora Lyda Patrícia Sabogal Paz, pela orientação e por todo suporte dado, estando sempre disponível quando precisei.

A Paula e ao Murillo, pela parceria durante todo o mestrado.

A Técnica do LATAR, Maria Teresa pela instrução na execução de parte das técnicas laboratoriais;

À Natália, ao Lucas, ao Paulo e a Bárbara, pela ajuda com as demais técnicas e pelas instruções dadas no laboratório.

Aos meus amigos da igreja OIKOS de São Carlos, por terem surgido no momento mais difícil e por terem me ajudado a vencer os medos desta etapa.

Aos meus amigos do estágio da graduação, Paulo, Geovani, Anna, Adriano, Hugo e Henrique pelos valiosos ensinamentos sobre estações de tratamento de águas.

Aos meus amigos da fiscalização de Maricá, Amanda, Graziano, Douglas, Luiz, Jordan, Núbia, Raphael, Jayme e Alexandre, pelo apoio e pela paciência em me escutar falar sobre este trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento por garantirem a infraestrutura e as condições para a realização desta pesquisa.

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa concedida.

Ao *The Royal Society* (*Grant Ref: ICA/R1/201373*), pelo financiamento desta pesquisa.



## RESUMO

Bessa, I. M. **Avaliação de Reator de LEDs UVA conjugado com tecido revestido com prata para a desinfecção de água de consumo**. 2022. 96p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021) determina que toda água destinada ao abastecimento humano precisa ser desinfetada. Métodos químicos de desinfecção podem gerar subprodutos potencialmente cancerígenos e os métodos físicos, como a desinfecção por lâmpadas de mercúrio UV, possuem custo relativamente alto, o que pode inviabilizar esta técnica em regiões de baixo poder aquisitivo. Novas alternativas de desinfecção podem melhorar a qualidade da água em domicílios e em regiões descentralizadas. Diante disso, esta pesquisa buscou avaliar, em termos de inativação de *Escherichia coli*, o desempenho de um reator de LEDs UVA na desinfecção com uso combinado de tecidos revestidos com prata. Também foi avaliada a eficiência de desinfecção do tecido de prata como único tratamento. Os resultados demonstraram que o reator de LEDs UVA atingiu o valor máximo de 1,1 log de redução de *E. coli*, para o maior tempo de contato testado (120 min). O uso combinado do reator com o tecido de prata não indicou sinergia na desinfecção. Os resultados indicaram que o tecido de prata sozinho foi eficiente para a desinfecção da água de estudo com concentração inicial de *E. coli* de  $10^6$ UFC/100mL para o tempo de contato de 15 min e volume de amostra de 250 mL.

Por fim, foi proposto um sistema de desinfecção com LEDs UVC, com a utilização de LEDs que emitem radiação ultravioleta no comprimento de onda de 275 a 285nm e realizada a análise econômica *Payback* do sistema. O retorno do investimento estimado foi de 16 anos, se comparado com o custo por abastecimento por caminhões pipa. O trabalho foi financiado pelo projeto de pesquisa temático internacional intitulado “*Low cost technologies for drinking water in Brazilian rural communities- household slow sand filters combined with ultraviolet LED disinfection*” outorgado pela *The Royal Society* (Grant Ref: ICA/R1/201373).

**Palavras-chave:** desinfecção de água; radiação ultravioleta; LEDs UVA, LEDs UVC, Tecidos revestidos com prata.

## ABSTRACT

Bessa, I. M. **Evaluation of UVA LED Reactor combined with silver coated fabric for the disinfection of drinking water.** 2022. 96p. Dissertation (Master's) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

The Brazilian potability law determines that all water intended for human consumption must be disinfected. Chemical disinfection methods can generate potentially carcinogenic by-products and the physical method of disinfection by UV mercury lamps has a relatively high cost, which may make this method unfeasible in regions of low income. New disinfection alternatives can improve water quality in households and in decentralized regions. Therefore, this research sought to evaluate, in terms of *Escherichia coli* inactivation, the performance of a disinfection system with a UVA LED reactor as the only disinfection mechanism and with the combined use of silver coated fabrics. The disinfection efficiency of silver fabric as a unique mechanism was also evaluated. The results showed that the UVA LED reactor achieved only 1.1 log reduction, for the longest contact time tested (120 minutes). The combined use of the reactor with the silver fabric did not indicate synergy in disinfection. The results indicated that silver fabric alone is efficient for disinfection of test water with *E. coli* inoculated at 106CFU/100mL, with a contact time of 15 minutes and a volume of 250mL.

Finally, a disinfection system with UVC LEDs was proposed, with the use of LEDs that emit ultraviolet radiation in the wavelength of 275 to 285nm and the *Payback* economic analysis of the system was performed. The estimated return on investment was 16 years, if compared to the supply by water trucks. The work was supported by the international thematic research project entitled “Low-cost technologies for drinking water in Brazilian rural communities-household slow sand filters combined with ultraviolet LED disinfection”, which has resources from The Royal Society (Grant Ref: ICA/R1/201373).

**Keywords:** water disinfection; ultraviolet radiation; UVA LEDs, UVC LEDs, Silver coated fabrics.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1.</b> Luz UV no espectro eletromagnético.....	6
<b>Figura 3.2-</b> Exemplo de sistema de desinfecção com lâmpadas UV de mercúrio.....	8
<b>Figura 3.3-</b> Exemplo de LED convencional .....	10
<b>Figura 3.4-</b> Exemplo de LED SMD .....	10
<b>Figura 3.5-</b> LED UV alta potência monocromático. ....	11
<b>Figura 3.6-</b> Reator de LEDs UV em escala municipal. ....	13
<b>Figura 3.7-</b> Reator de LEDs UV por acionamento manual. ....	13
<b>Figura 3.8-</b> Garrafa com tampa de LEDs UVC. ....	14
<b>Figura 3.9-</b> Processos de ação antimicrobiana das nanopartículas de prata. ....	16
<b>Figura 4.1-</b> Bandeja de aço Inox e reator de LEDs UVA.....	21
<b>Figura 4.2-</b> Bandeja de aço Inox e reator de LEDs UVA.....	22
<b>Figura 4.3-</b> Detalhamento da bandeja de aço inox utilizada (planta e corte). ....	22
<b>Figura 4.4-</b> Detalhamento do reator de LEDs UVA (Planta e corte) .....	23
<b>Figura 4.5-</b> LED UVA K1322 (Dimensões em milímetros) .....	24
<b>Figura 4.6-</b> Esquema elétrico do Reator UVA. ....	24
<b>Figura 4.7 -</b> Tecidos revestidos com prata.....	25
<b>Figura 4.8-</b> Balões volumétricos após leitura no espectrofotômetro. ....	27
<b>Figura 4.9-</b> Solução actinométrica em agitação.....	27
<b>Figura 4.10 -</b> Ordem e testes aplicados nas análises estatísticas .....	34
<b>Figura 5.1-</b> Variação de temperatura da água - Reator de LEDs UVA.....	44
<b>Figura 5.2-</b> Variação de temperatura da água - Reator de LEDs UVA combinado com o Tecido de Prata. ....	45
<b>Figura 5.3-</b> Variação de temperatura da água - Tecido de Prata. ....	45
<b>Figura 5.4-</b> Variação de turbidez da água - Reator de LEDs UVA. ....	46
<b>Figura 5.5-</b> Variação de turbidez da água - Reator de LEDs UVA combinado com o tecido de Prata. ....	47
<b>Figura 5.6-</b> Variação de turbidez da água - Tecido de Prata. ....	47
<b>Figura 5.7-</b> Valores de pH nos três tipos de testes realizados. ....	49
<b>Figura 5.8-</b> Valores da condutividade nos três tipos de testes realizados.....	51
<b>Figura 5.9-</b> Valores da absorbância nos três tipos de testes realizados. ....	52
<b>Figura 5.10-</b> Valores da transmitância nos três tipos de testes realizados.....	53
<b>Figura 5.11-</b> Remoção de E. coli na água desinfetada pelo Reator de LEDs UVA ao longo dos tempos de contato. ....	54

<b>Figura 5.12-</b> Remoção de E. coli nos testes em branco de controle ao longo dos tempos de contato. ....	54
<b>Figura 5.13-</b> Remoção de E. coli na água desinfetada pelo tecido de prata ao longo dos tempos de contato.....	55
<b>Figura 5.14 -</b> Remoção de E. coli nos testes em branco de controle ao longo dos tempos de contato. ....	56
<b>Figura 5.15-</b> Remoção de E. coli pelo Reator de LEDs UVA combinado com o tecido de prata. ....	57
<b>Figura 6.1-</b> Componentes da estrutura do sistema de desinfecção com reator UV LED. ....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1-</b> Propriedades e resultados de estudos de desinfecção de água que utilizaram nanopartículas de prata. ....	18
<b>Tabela 5.1-</b> Resultados da taxa de formação de ferro, da dose de radiação e da intensidade de radiação do reator UVA.....	35
<b>Tabela 5.2</b> – Resultados da média, do desvio padrão e das diferenças estatísticas referente ao ensaio de medição de dose UVA.....	36
<b>Tabela 5.3-</b> Dose real aplicada por área e volumétrica do reator de LEDs UVA.....	36
<b>Tabela 5.4-</b> Parâmetros analisados da água de estudo .....	37
<b>Tabela 5.5-</b> Parâmetros gerais após desinfecção com o reator de LEDs UVA .....	38
<b>Tabela 5.6</b> - Parâmetros gerais após desinfecção com o reator de LEDs UVA combinado com a mata de prata.....	39
<b>Tabela 5.7-</b> Parâmetros gerais após desinfecção com o tecido de prata .....	40
<b>Tabela 5.8-</b> p-valor para os testes estatísticos aplicados entre as repetições realizadas. ....	41
<b>Tabela 5.9-</b> p-valor para os testes estatísticos aplicados entre os diferentes tempos de contato .....	42
<b>Tabela 5.10</b> – p-valor de interesse da diferença estatística entre as três condições de desinfecção realizadas .....	43
<b>Tabela 6.1-</b> Materiais necessários estimados para construção do sistema de desinfecção com reator de LEDs UVC. ....	60
<b>Tabela 6.2-</b> Investimento total estimado para construção do sistema de desinfecção com reator de LEDs UVC.....	62
<b>Tabela 6.3-</b> Tempo de retorno estimado pelo método do Payback Simples.....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ag: Prata

Al: Alumínio

B: Bório

CPD: Dímeros de pirimidina ciclobutano

DNA: Ácido Desoxirribonucleico

EROs: Espécies reativas de oxigênio

EESC/USP: Escola de Engenharia de São Carlos/ Universidade de São Paulo

Fe: Ferro

Ga: Gálio

GTW: *General Test Water* (Água de teste geral)

HIV: *Human Immunodeficiency Virus* (Vírus da imunodeficiência humana)

IGP-M: Índice Geral de Preços de Mercado

LATAR: Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas

LED: *Light-emitting diodes* (Diodos emissores de Luz)

LP: *Low Pressure* (Baixa Pressão)

mA: Miliampere

mcd: Unidade de medida de intensidade luminosa

mg: Miligramas

MON: Matéria orgânica natural

mL: Mililitros

N: Nitrogênio

nm: Nanômetros

NPs: Nanopartículas

NTU: Unidade de Turbidez Nefelométrica

PBS: *Phosphate buffered saline solution* (Solução salina tamponada com fosfato)

PET: Politereftalato de etileno

pH: Potencial Hidrogeniônico

PCB: *Printed Circuit Board*

RNA: Ácido Ribonucleico

SDT: Sólidos Dissolvidos Totais

SMD: *Surface Mounted Diode* (Diodo montado em superfície)

TSB: Caldo Triptona de Soja

UFC: Unidades Formadoras de Colônias

USEPA: *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos).

USP: Universidade de São Paulo

UV: Radiação Ultravioleta

UVA: Radiação Ultravioleta da faixa A do espectro.

UVB: Radiação Ultravioleta da faixa B do espectro.

UVC: Radiação Ultravioleta da faixa C do espectro.

V: Volts

W: Watt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1	PROBLEMÁTICA A RESPEITO DOS MÉTODOS TRADICIONAIS DE DESINFECÇÃO DE ÁGUA DE CONSUMO.....	4
3.2	DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA .....	5
3.3	LEDs ULTRAVIOLETA .....	9
3.4	DESINFECÇÃO DE ÁGUA POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA COM O USO DE LEDs.....	12
3.5	DESINFECÇÃO COM O USO DE PRATA .....	15
3.6	<i>E. COLI</i> COMO INDICADOR DE RISCO MICROBIOLÓGICO .....	19
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
4.1	REATOR DE LEDs UVA .....	21
4.1.1	<i>LEDs UVA</i> .....	23
4.2	TECIDO DE PRATA .....	25
4.3	MEDIÇÃO DA INTENSIDADE DE RADIAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA .....	26
4.4	MICROORGANISMO DE ESTUDO ( <i>E. COLI</i> ) .....	30
4.4.1	<i>Cultura de E. coli</i> .....	30
4.4.2	<i>Detecção de E. coli</i> .....	30
4.5	ÁGUA DE ESTUDO.....	30
4.6	ENSAIOS DE DESINFECÇÃO .....	31
4.6.1	<i>Ensaios de desinfecção com o Reator UVA</i> .....	31
4.6.2	<i>Ensaios de desinfecção com o tecido de Prata</i> .....	32
4.6.3	<i>Ensaios de desinfecção com o Reator UVA e o tecido de prata combinados</i> .....	32
4.7	ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS .....	33
4.8	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	33
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>



5.1	INTENSIDADE DE RADIAÇÃO E DOSAGEM DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA .....	35
5.1.1	<i>Intensidade máxima dos LEDs em função dos dados do fabricante .....</i>	<i>35</i>
5.1.2	<i>Intensidade de radiação medida por actinometria química.....</i>	<i>35</i>
5.1.3	<i>Quantificação das doses reais de radiação UVA aplicada nos testes de desinfecção .....</i>	<i>36</i>
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO .....	37
5.3	QUALIDADE DA ÁGUA DESINFETADA COM O REATOR DE LEDs UVA .....	38
5.4	QUALIDADE DA ÁGUA DESINFETADA COM O REATOR DE LEDs UVA COMBINADO COM O TECIDO DE PRATA .....	39
5.5	QUALIDADE DA ÁGUA DESINFETADA COM O TECIDO DE PRATA .....	40
5.6	DIFERENÇAS ESTATÍSTICAS .....	40
5.7	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS .....	44
5.7.1	<i>Temperatura .....</i>	<i>44</i>
5.7.2	<i>Turbidez.....</i>	<i>46</i>
5.7.3	<i>Demais parâmetros físicos de qualidade da água.....</i>	<i>48</i>
5.8	PARÂMETRO MICROBIOLÓGICO ( <i>E. COLI</i> ) .....	53
5.8.1	<i>Desinfecção pelo Reator de LEDs UVA.....</i>	<i>54</i>
5.8.2	<i>Desinfecção pelo tecido de Prata.....</i>	<i>55</i>
5.8.3	<i>Desinfecção pelo Reator de LEDs UVA combinados com o tecido de Prata .....</i>	<i>57</i>
<b>6</b>	<b>SISTEMA UVC-LED EM ESCALA DOMICILIAR.....</b>	<b>58</b>
6.1	REATOR DE LEDs UVC DOMICILIAR.....	58
6.2	ESTIMATIVA DE CUSTOS DE INVESTIMENTO .....	60
6.3	<i>PAYBACK SIMPLES .....</i>	<i>62</i>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Segundo a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), toda a água destinada ao abastecimento humano precisa ser desinfetada. Diversos métodos químicos e físicos, se operados dentro de condições adequadas oferecem uma efetiva desinfecção e todos eles apresentam vantagens e desvantagens. A seleção de uma tecnologia de desinfecção requer a consideração de diversos fatores, além da qualidade da água a ser tratada, como o custo, disponibilidade de materiais e produtos químicos, toxicidade etc. Desta forma, é de extrema importância avaliar cada caso em sua particularidade e desenvolver tecnologias mais econômicas e seguras, para que a desinfecção seja possível e otimizada em todas as realidades.

A desinfecção por radiação ultravioleta (UV) é um método que vem sendo utilizado para evitar a produção subprodutos potencialmente cancerígenos, causados pela desinfecção com oxidantes fortes, como o cloro, na presença de matéria orgânica (PASCHOALATO, 2008). No entanto, o custo da tradicional desinfecção UV com lâmpadas de mercúrio é relativamente alto, o que pode inviabilizar o uso desse método em locais de baixo poder aquisitivo. Uma alternativa que vem sendo estudada nos últimos anos é a desinfecção por LEDs ultravioleta.

Estudos em escala de bancada, mostraram que os diodos emissores de Luz (LEDs) UV são eficazes na inativação de microrganismos, ao se utilizar determinados comprimentos de onda e dose UV (SONG *et al.*, 2016; WRF, 2015). A inativação de microrganismos ocorre ao longo de todo espectro UV, embora os LEDs pertencentes ao espectro UVC (200 - 280nm) demonstrem uma maior capacidade bactericida (BOLTON, 2017; LI *et al.*, 2019).

Devido ao significativo custo e a necessidade de importação dos LEDs UVC em países em desenvolvimento como o Brasil, é fundamental verificar a eficiência de alternativas mais acessíveis e de baixo custo. Os LEDs UVA (315 – 400nm) possuem baixo custo no país, portanto é fundamental verificar a viabilidade e a eficiência da desinfecção, através do uso destes LEDs, com o fim de desenvolver processos mais econômicos e eficientes, para que seja possível aplicar em projetos de baixo custo em países em desenvolvimento.

Neste contexto, a presente pesquisa buscou avaliar a eficiência da desinfecção através de um reator de LEDs UVA, a partir do uso de água de estudo contaminada com *Escherichia coli*.

Concomitante ao estudo da eficiência do reator, esta pesquisa investigou a eficiência de desinfecção de água de estudo contaminada com *E. coli*, por um tecido revestido com prata, de forma isolada e combinada com o reator UVA. Estes tecidos são atualmente produzidos e

comercializados para a utilização em diferentes aplicações, como no tratamento de feridas, em suprimentos médicos, para a proteção eletromagnética etc.

É importante explorar a capacidade de desinfecção de materiais mais simples, como os tecidos de prata, em alternativa a materiais mais complexos impregnados com prata, para o auxílio do desenvolvimento de novas tecnologias descentralizadas para a desinfecção de água de consumo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar o desempenho de um reator de LEDs UVA conjugado ou não com tecido revestido com prata na inativação de *Escherichia coli* em água de estudo.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Desenhar e construir um reator com LEDs UVA para de desinfecção de água de consumo em escala de bancada.
- Avaliar o desempenho do reator na desinfecção da água contaminada com *Escherichia coli*, como processo único ou combinado com a utilização de tecido revestido com prata e avaliar, também, o desempenho do tecido de forma isolada.
- Propor um sistema de desinfecção de água de consumo envolvendo um reator ultravioleta com o uso de LEDs em escala domiciliar.
- Estimar os custos e realizar a análise econômica (*Payback*) do reator de LEDs proposto.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Problemática a Respeito dos Métodos Tradicionais de Desinfecção de Água de Consumo

A desinfecção é um processo em que comumente se utiliza um agente químico ou físico para inativar microrganismos patogênicos presentes na água, incluindo bactérias, vírus e protozoários (Dias, 2001). Entre os desinfetantes químicos utilizados, destaca-se o cloro gasoso, hipoclorito de sódio ou de cálcio, o ozônio, o dióxido de cloro, monocloramina, o permanganato de potássio, mistura de ozônio com peróxido de hidrogênio, o íon ferrato e o ácido peracético (PROSAB, 2001).

Muitos desinfetantes químicos, por serem oxidantes fortes, podem gerar subprodutos da desinfecção que, apesar da baixa concentração, podem ser danosos aos consumidores (PROSAB, 2001).

O cloro é o desinfetante químico mais utilizado, no entanto, quando a água é clorada com a presença de matéria orgânica natural (MON), esta pode reagir com o cloro, causando a formação de compostos orgânicos halogenados.

Os trihalometanos são os principais subprodutos resultantes da reação do cloro livre com, principalmente, os ácidos húmicos e fúlvicos presente na MON (PASCHOALATO, 2008). A portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), determina que a quantidade máxima de trihalometanos permitidos na água para consumo seja de 0,1 mg/L. Os trihalometanos são subprodutos potencialmente causadores de problemas no sistema reprodutivo e podem gerar maior propensão ao câncer (SILVA, 2015).

Outro fator importante a ser considerado na desinfecção com cloro é a presença de odor e gosto na água deixado por este agente químico. Algumas comunidades, como por exemplo Yayani Alto na Bolívia, muitas vezes rejeitam este método de desinfecção por deixar a água de consumo com gosto característico, visto que estas populações estavam acostumadas a consumir água diretamente de rios e nascentes (IRIARTE, 2021).

Com o intuito de substituir os métodos químicos e diminuir a formação de subprodutos com potencial cancerígeno, os métodos físicos de desinfecção foram difundidos. Esta categoria engloba a radiação ultravioleta, a radiação solar e o calor.

O calor e a radiação solar são efetivos e possuem baixo custo, por isso são amplamente utilizados em emergências, em regiões afastadas e em locais menos favorecidos. Contudo estes

métodos também possuem limitações que podem prejudicar a eficiência e a viabilidade desses métodos em algumas ocasiões.

A desinfecção por calor, apesar de eficiente para inativar a maioria dos microrganismos causadores de doenças de veiculação hídrica, apresenta desvantagens como: perda dos gases dissolvidos durante a ebulição, o que confere um gosto que não é agradável ao paladar e alto custo atrelado à necessidade de combustível para a realização da fervura (SABOGAL PAZ, 2007).

A desinfecção por radiação solar é atraente em pequenas comunidades por não precisar de energia elétrica e ser um método simples, no entanto, este método também pode ser limitado, como pela necessidade de longo período de exposição à radiação, pela elevada turbidez que permite que microrganismos aderidos à matéria em suspensão se protejam da radiação, por condições climáticas adversas, entre outros. (SABOGAL PAZ, 2007).

Outro ponto negativo dos métodos físicos é que, diferente de alguns desinfetantes químicos, como o cloro, eles não deixam agentes residuais para que a desinfecção continue ocorrendo. Quando tratada por agentes físicos é importante que a água seja consumida próxima ao momento da desinfecção, pois certos microrganismos tendem a se recuperar ou a água pode ser contaminada novamente, a depender das condições de manutenção do tipo de reservação adotada.

A radiação ultravioleta com o uso de lâmpadas germicidas é um método de desinfecção físico amplamente utilizado, principalmente em países desenvolvidos. No entanto, as lâmpadas de vapor de mercúrio, comumente utilizadas na desinfecção UV, são frágeis, com frequência causam derramamento de mercúrio, possuem baixa durabilidade e um custo que podem inviabilizar sua aplicação em locais de baixo poder aquisitivo (LI *et al.*, 2019).

Um novo método de desinfecção por radiação ultravioleta com o uso de LEDs UV vem sendo estudado nos últimos anos, com o desenvolvimento e a maior utilização desta tecnologia, os LEDs UV e os reatores construídos tendem a se tornarem mais econômicos e mais efetivos.

Outro método que tem sido estudado e desenvolvido nos últimos anos é a desinfecção por materiais impregnados por nanopartículas de prata. A capacidade de desinfecção da prata é conhecida, no entanto, com o desenvolvimento da nanotecnologia, foi possível aumentar a área de contato e a capacidade bactericida deste material (CHEN, 2008).

### **3.2 Desinfecção por Radiação Ultravioleta**

O uso da radiação ultravioleta (UV) na inativação de microrganismos foi observado pela primeira vez por dois cientistas ingleses em meados do século XIX, na época em que o consumo

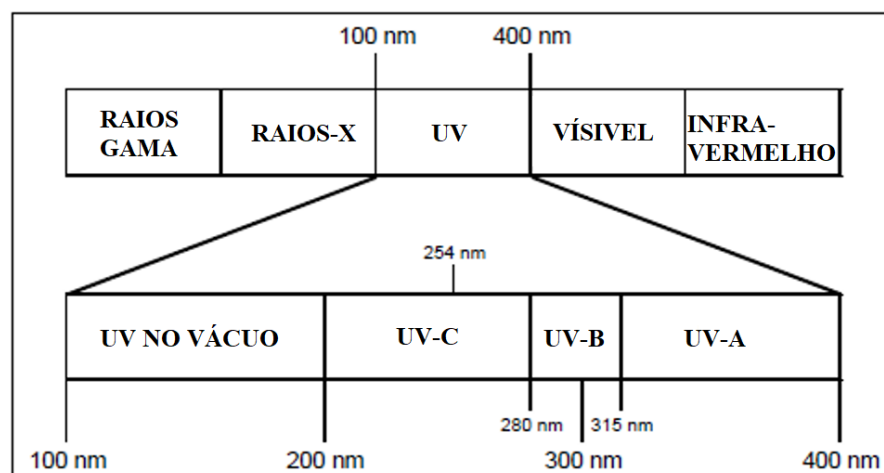
de água contaminada gerou surtos de doenças em toda Europa, Ásia e Américas. Os cientistas investigaram os efeitos da luz sobre microrganismos ao acompanhar o crescimento bacteriano em tubos de ensaio preenchidos com açúcar mascavo. Pôde-se observar que o crescimento das bactérias que foram expostas ao sol foi inibido por até um mês (DOWNES; BLUNT, 1877).

O primeiro sistema artificial de desinfecção com lâmpadas UV, em larga escala, foi instalado para tratar água filtrada do rio em Marselha, na França, mas logo foi substituído pela desinfecção com o uso de cloro (HENRI *et al.*, 1910). Décadas depois, devido ao surgimento de preocupações relacionadas à formação de subprodutos carcinogênicos na cloração, a desinfecção com luz UV começou a predominar nas estações de tratamento de água na Europa (SOMMER *et al.*, 2002).

Com a descoberta de que a luz ultravioleta é capaz de combater não apenas bactérias e vírus, mas também protozoários altamente resistentes ao cloro, como *Cryptosporidium* e *Giardia* (CLANCY *et al.*, 1998; HIJNEM *et al.*, 2006), U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) passou a exigir a desinfecção com radiação UV como barreira secundária à cloração, para prevenir surtos destas doenças (USEPA, 2006).

A radiação ultravioleta compreende a região do espectro eletromagnético entre os raios-X e a luz visível, com o comprimento de onda entre os limites de 100 a 400nm (USEPA, 2003) (Figura 3.1) e pode ser dividida nas faixas de comprimento de onda: UVA- 315 a 400 nm; UVB- 280 a 315 nm e UVC - 200 a 280nm (LI *et al.*, 2019). Diversos estudos mostram que a inativação de bactérias, vírus e outros microrganismos pode ocorrer ao longo de todo espectro UV, no entanto, a inativação é mais eficiente na faixa do UVC, entre 260 e 270nm e abaixo de 230 nm (BECK *et al.*, 2015; BOLTON, 2017).

**Figura 3.1.** Luz UV no espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de USEPA, 2003.

Os fótons liberados pela radiação UV podem inativar os microrganismos através de diversos processos (em comprimentos de onda distintos), como pela geração de danos às ligações do DNA ou RNA, danos a proteínas vitais e danos nas transferências de energia (BESARATINA *et al.*, 2011; BECK *et al.*, 2018).

Quando microrganismos compostos com material genético de DNA ou RNA de fita simples absorvem luz UV, ocorrem danos em suas ligações, que impedem que estes sejam replicados (HIJNEN *et al.*, 2006; BECK *et al.*, 2018), deste modo, os microrganismos são impedidos de se reproduzir. De acordo com Sinha e Häder (2002), as lesões mutagênicas de DNA induzidas por radiação UV pertencem a duas classes principais: dímeros de pirimidina de ciclobutano (CPDs) (correspondentes a 75% dos produtos gerados) e 6-4 fotoprodutos. Além do material genético, outros componentes como a membrana celular e as proteínas (com picos de absorção em comprimentos de onda distintos) podem estar envolvidos na inativação por luz UV (CHEN *et al.*, 2009).

Muitos microrganismos desenvolveram processos de reparo de DNA para neutralizar os efeitos dos danos induzidos por radiação UV (LAZAROVA *et al.*, 1999). Um dos processos é a fotorreativação, que ocorre quando a enzima fotoliase se liga aos Dímeros de pirimidina ciclobutano (CPD), os quais são lesões mutagênicas de DNA induzidas por radiação UV e reverte os danos utilizando a energia da luz de comprimentos de onda de 310 a 480nm (UVA ou luz visível parcial) (SINHA; HADER, 2002). Outro processo é o reparo no escuro (*Dark Repair*), em que o fragmento de DNA danificado é substituído por nucleotídeos íntegros, sem utilizar a luz, este reparo causa efeitos mínimos (SINHA; HADER, 2002). No entanto, a maioria dos reparos de DNA ocorre sob baixas doses de radiação UV (LI *et al.*, 2019).

Segundo Chevremont *et al.* (2012 a), radiação UVA pode danificar a membrana celular e outros componentes celulares ao produzir radicais de hidroxila e oxigênio, para danificar proteínas. Ou seja, UVA inativa microrganismos ao causar danos irreparáveis nas células, ao promover a formação de espécies ativas. Enquanto com as radiações UVB e UVC, os danos genômicos podem ser reparáveis através de processos de restauração de DNA (FRIEDBERG *et al.*, 1995; OGUMA *et al.*, 2013).

Independente do comprimento de onda utilizado, a dose UV é o fator mais importante. Baixas doses de UVC, por exemplo, causam auto-reparação nas bactérias *B. Subtilis* e *Salmonella Typhi* (Chen *et al.*, 2009). Baixas doses de radiação UVA causam fotorreativação (LI *et al.*, 2019).



A dose de radiação ultravioleta é dada pelo produto da intensidade de radiação pelo tempo de exposição (Equação 3.1). Este termo é utilizado para representar a exposição de um dado organismo à irradiação (PROSAB, 2001).

$$D = I . t \quad (3.1)$$

D: dose de radiação ultravioleta (mJ/cm<sup>2</sup> ou mW.s/cm<sup>2</sup>);

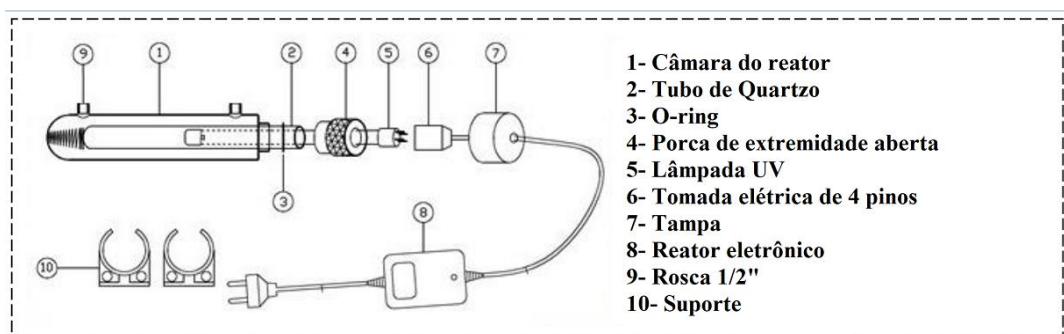
I: intensidade de radiação (mW/cm<sup>2</sup>)

t: tempo de exposição (s).

Diversos fatores afetam a eficiência da inativação dos microrganismos, como densidade bacteriana, pH, tempo de exposição à radiação UV, comprimento de onda, dose UV, por isso é importante desenvolver uma abordagem ampla ao lidar com este tipo de desinfecção (CHEVREMONT *et al.*, 2012 b).

Os sistemas em larga escala de desinfecção UV, comumente utilizam lâmpadas de vapor de mercúrio, que emitem luz na faixa visível e ultravioleta do espectro eletromagnético (BECK *et al.*, 2018). As lâmpadas de baixa pressão (LP), com pressão abaixo de 1333,22 Pa, emitem luz UV quase totalmente de forma monocromática, em um comprimento de onda de 254 nm (próximo ao pico de absorção 260 nm) e as lâmpadas de média pressão, emitem uma radiação policromática, com vários comprimentos de onda (200 - 600nm) (BOLTON; COTTON, 2008). A Figura 3.2 exibe um exemplo de um sistema de desinfecção com lâmpadas UV comercial.

**Figura 3.2-** Exemplo de sistema de desinfecção com lâmpadas UV de mercúrio



Fonte: Adaptado de Filterinter (Filterinter Equipamentos LTDA., Campinas, SP., Brasil)

No entanto, as lâmpadas de mercúrio são frágeis e causam derramamento de mercúrio tóxico com facilidade (LI *et al.*, 2019). Além disso, possuem baixa durabilidade (cerca de 4.320 horas), possuem alto custo e necessitam de tempo de aquecimento antes de começar o processo de desinfecção, por estes motivos, é relevante desenvolver outras formas de desinfecção UV. A radiação ultravioleta com o uso de LEDs vem sendo estudada e desenvolvida nos últimos anos. Mais detalhes sobre este recente método são expostos nos tópicos 3.3 e 3.4, a seguir.

### 3.3 LEDs Ultravioleta

Os diodos emissores de luz ou *light-emitting diodes* (LEDs) ultravioleta (UV) são fontes de emissão de luz com potencial para a desinfecção de água de consumo (HULL *et al.*, 2019). Eles são diodos semicondutores que consistem em um substrato estável, como silício ou germânio e são cobertos (processo de dopagem) com impurezas específicas que permitem a produção de corrente elétrica. Conforme uma tensão é aplicada, os elétrons livres do circuito fluem para os espaços nos anéis de elétrons, formados devido a impurezas no substrato dopado. Ao cair em um estado de baixa energia, eles liberam seu excesso de energia na forma de luz (BECK *et al.*, 2018). A quantidade específica de energia liberada se torna fótons ou luz em um determinado comprimento de onda, esse efeito é denominado eletroluminescência (NEAMEN, 2011).

Os LEDs UV possuem comprimento de onda ajustável e podem emitir radiação de 210 nm até comprimentos de onda relativos à luz visível (SHUR; GASKA, 2010), pois podem ser desenvolvidos para emitir comprimentos de onda específicos ao alterar a diferença de energia, que é dependente da composição do material do semicondutor no diodo (IBRAHIM *et al.*, 2013).

Os LEDs UV podem ser fabricados em uma variedade de materiais semicondutores. Podem ser de silício, germânio, diamante, determinadas combinações de alumínio, nitrogênio, gálio, boro e índio, como: BN, AlN, AlGaN e AlGaInN, entre outros (BECK *et al.*, 2018; LABRIOLA, 2017).

Existem diversos tipos de LED UV. Em pesquisa ao site Mouser Electronics (<https://br.mouser.com/>), plataforma que diz exibir o maior estoque de semicondutores e componentes eletrônicos no mundo, em julho de 2022, foram encontrados 330 componentes eletrônicos, através da pesquisa com as palavras chaves “LED UV”. Os componentes encontrados podem ser divididos nas seguintes categorias de interesse: LEDs padrão vazados, LEDs padrão SMD (*Surface Mounted Diode*), LEDs de alta potência – Monocromáticos e LEDs de alta potência- Policromático.

Os LEDs padrão vazados ou convencionais podem ser representados pelo exemplo exibido na Figura 3.3, eles são compostos por refletor, semicondutor, fio condutor, por uma capsula, pelo catodo e pelo anodo.

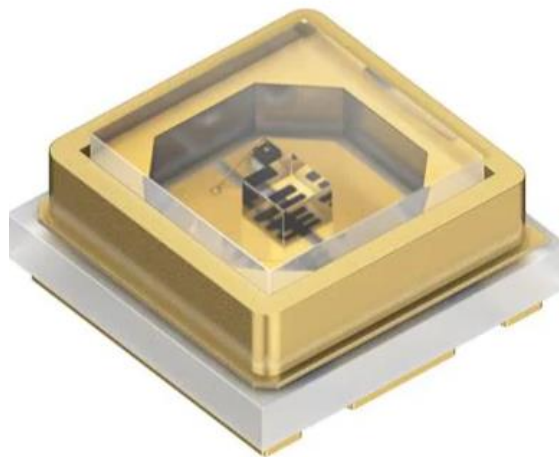
**Figura 3.3-** Exemplo de LED convencional



Fonte: BIVAR (Bivar Inc. Irvine, CA, EUA)

Os LEDs padrão miniatura ou SMD, que quer dizer diodo montado em superfície (Figura 3.4) diferem dos LEDs vazados por serem montados e soldados sobre uma placa de circuito de dimensões reduzidas (FERREIRA, 2014). Emitem maior luminosidade que LEDs convencionais, por ter sua superfície otimizada.

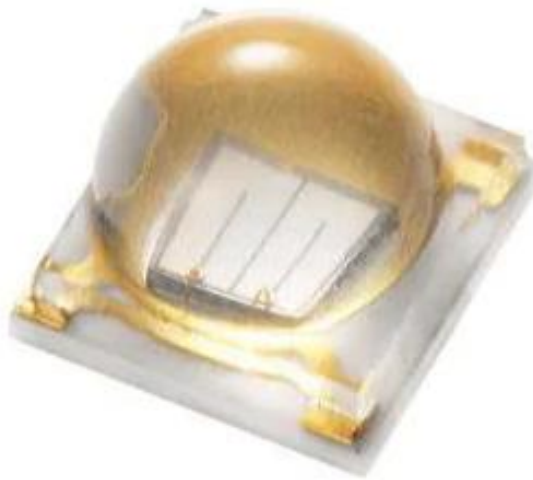
**Figura 3.4-** Exemplo de LED SMD



Fonte: OSRAM (OSRAM Licht AG., Munique, Alemanha).

Os LEDs de alta potência são LEDs que suportam a aplicação de valores mais altos de corrente na junção dos semicondutores. Eles são conhecidos por suportar potências superiores a 1 watts, enquanto os de baixa potência, costumam não ultrapassar 0,10 watts (GOLATA, 2019). Estes LEDs podem emitir luz em comprimento de onda específico (monocromático) ou em comprimentos de onda distintos (policromático). A Figura 3.5, exibe um exemplo de LED UV de alta potência monocromático.

**Figura 3.5-** LED UV alta potência monocromático.



Fonte: Inolux (Inolux Co., Santa Clara, CA, EUA).

Nos últimos anos, diversos estudos têm sido realizados visando investigar a aplicação de LEDs ultravioleta no segmento da desinfecção, degradação, purificação, entre outros, visto que com o desenvolvimento da tecnologia, o gasto com os LEDs tem diminuído. Os LEDs têm gerado estudos para aplicações biomédicas, odontológicas, na indústria de alimentos, na degradação de variados compostos, na desinfecção de água etc.

Persaud *et al.* (2022) demonstraram a eficácia dos LEDs UV (275 e 380nm) na descontaminação de dois tipos de vírus, o coronavírus 229E e o HIV, e destacaram a viabilidade de utilização desta tecnologia, para a sanitização de espaços públicos. Morio *et al.* (2022) salientaram que o tratamento de canais dentários com LEDs UV pode desinfetar regiões em que os tratamentos mecânicos e químicos sofrem limitações.

Em estudos voltados para a indústria de alimentos, Kim *et al.* (2022) testaram o uso dos LEDs UVC combinados com embalagens antimicrobianas, para preservar vegetais frescos. O uso combinado demonstrou alto potencial em aumentar a validade dos vegetais, sem a necessidade de utilizar tratamento térmico ou de adicionar químicos. Soro *et al.* (2021) avaliaram a eficácia de um dispositivo baseado em LEDs ultravioleta (255, 280, 300 e 365nm) em reduzir a carga microbiana na carne de frango. Foram atingidas reduções de até 2 log UFC/g, o que demonstrou que essa tecnologia pode ser utilizada na preservação de carne de frango e ao mesmo tempo manter atributos de qualidade.

Os LEDs UV também têm sido recentemente estudados na degradação, através do processo foto-fenton, de compostos como metil paration, corante rodamina B, antibiótico

tetraciclina, corante azul de metileno, pesticida acetamiprida, antipiririna etc. O processo fotofenton trata da oxidação de compostos orgânicos sob radiação UV, na presença de complexos férricos em meio ácido; neste processo, são gerados radicais hidroxila, responsáveis pela oxidação dos compostos (LABRIOLA, 2017).

Na desinfecção de água, os LEDs UV têm sido estudados com a finalidade de substituir as lâmpadas de mercúrio, visando melhor custo-benefício e alternativa menos nociva ao meio ambiente. Mais informações sobre aplicações de LEDs UV na desinfecção de água são exibidas no tópico 3.4, a seguir.

### **3.4 Desinfecção de água por Radiação Ultravioleta com o uso de LEDs**

A desinfecção de água por LEDs UV pode ser mais sustentável do que a tradicional desinfecção com lâmpadas UV, pois o LED não contém mercúrio tóxico, possui menor necessidade energética e ocupa menor espaço (BECK *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2016). Além destas vantagens, o LED possui capacidade de ligar e desligar quase que instantaneamente, requer o uso de baixa tensão, baixa energia e possui longa vida útil (WURTELE *et al.*, 2011).

Devido a suas características, os LEDs UV possuem o potencial de transformar a desinfecção da água em países desenvolvidos e em desenvolvimento (BECK *et al.*, 2017). Nos últimos anos, diversos estudos têm sido realizados com a finalidade de testar diferentes configurações de LEDs UV na desinfecção de água. Os sistemas compostos por LED UVC são os mais estudados, embora haja alguns estudos com os LEDs UVA e UVB e outros com combinação de LEDs de faixas do espectro ultravioleta distintas.

De acordo com Song *et al.* (2016) e WRF (2015), a desinfecção por LEDs UVC possui eficácia comprovada em escala de bancada, na inativação de bactérias, vírus e protozoários, ao se utilizar radiação com determinados comprimentos de onda e dose UV.

Estudos demonstram que os LEDs capazes de emitir luz UV, com o comprimento pertencente ao espectro UVC, possuem uma maior capacidade bactericida (VILHUNEM *et al.*, 2009); (LI *et al.*, 2019).

Jarvis *et al.* (2019) compararam a eficácia de um reator convencional de lâmpadas de mercúrio com um reator de LEDs UVC (275nm) em escala real, para tratamento de água potável em escala municipal (Figura 3.6). O estudo concluiu que o sistema proposto foi tão eficaz quanto os de lâmpada de mercúrio. Na desinfecção de MS2, o reator UVC alcançou 0,5-3,9 log de redução para a dose aplicada de 4,5-27mJ/cm<sup>2</sup>.

**Figura 3.6-** Reator de LEDs UV em escala municipal.

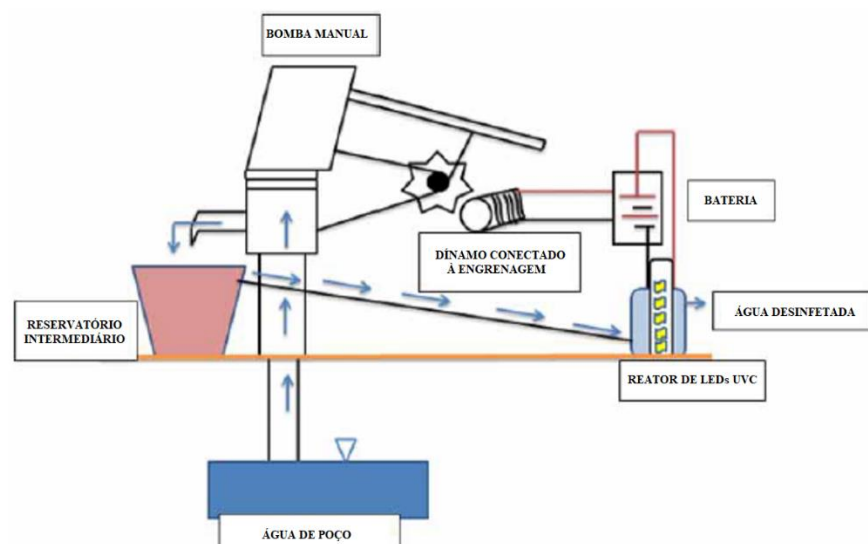


Fonte: JARVIS, 2019.

Shen *et al.* (2020) estudaram a inativação de duas bactérias Gram-positivas resistentes à tetraciclina do gênero *Bacillus*. Os resultados mostraram que LEDs UVC com o comprimento de onda de 268nm foram capazes de inativar até 5,7 log das bactérias.

Sundar e Kanmani (2021) desenvolveram um reator de LEDs UVC (275nm) acionado por bombas manuais (Figura 3.7), visando sua utilização em comunidades rurais. O sistema desenvolvido atingiu a inativação total de *E. coli* (2 logs) durante o tempo de contato de 6 min. A dose aplicada foi de 4,68 mJ/cm<sup>2</sup>.

**Figura 3.7-** Reator de LEDs UV por acionamento manual.



Fonte: Adaptado de PIRIYAH,2021.

Mariita *et al.* (2021) investigaram a eficácia de garrafas de aço inoxidável de 500 e 600 mL, com tampa contendo um reator de LEDs UVC (268,5 nm) . O estudo concluiu que a

garrafa (Figura 3.8) alcançou mais de 99,99% (4 log) de eficácia na inativação de *E. coli* ATCC 29425, em tempo de contato de 55 segundos. Para a desinfecção de *P. aeruginosa* ATCC 15442 e *V.cholerae* ATCC 25872, foi alcançada eficácia de inativação de mais de 99,90% (3 log).

**Figura 3.8-** Garrafa com tampa de LEDs UVC.



Fonte: MARIITA *et al.*, 2021.

Outro ponto importante a ser considerado na desinfecção com métodos ultravioleta, que não deixam residual para a continuidade da desinfecção ao longo de um determinado período, é a capacidade de os microrganismos se recuperarem após a desinfecção.

Li *et al.* (2017) compararam a fotorreativação e o reparo no escuro de *Escherichia coli* desinfetada por LEDs de 265 nm, 280 nm, de forma isolada e combinados, com o reparo ocorrido na desinfecção por lâmpadas ultravioleta de baixa pressão. O estudo concluiu que apesar de os LEDs de 265 nm terem maior eficácia na inativação do que os LEDs de 280 nm e as lâmpadas UV de baixa pressão, os LEDs de 280nm inibiram significativamente mais a fotorreativação e o reparo no escuro, com a utilização de baixa intensidade de radiação de 6,9mJ/cm<sup>2</sup>. O processo proposto foi o dano causado ao DNA de enzimas responsáveis pela recuperação, no uso de LEDs de 280nm.

Apesar da eficiência comprovada dos LEDs UVC na desinfecção de determinados microrganismos, os LEDs UVC possuem alto custo, em países como o Brasil, por exemplo, devido à necessidade de importação.

Alguns estudos relatam a eficiência de desinfecção de reatores construídos com LEDs UVA. Estudos realizados por Hamamoto *et al.* (2007) mostraram que LEDs UVA (365nm) de alta energia foram capazes de reduzir *Escherichia coli*, *Vibrio parahaemolyticus*, *Staphylococcus aureus* em mais de 5 log com o tempo de contato de 75 min e dose de 315J/cm<sup>2</sup>.

O mesmo sistema foi capaz de reduzir *Salmonella enteritidis* em mais de 4 log em 160 min e com dose de 672 J/cm<sup>2</sup>.

Outras pesquisas investigaram a inativação referente à exposição por diferentes comprimentos de onda combinados. Song *et al.* (2019) investigaram a desinfecção e o reparo de *E. coli* e MS2, na água com diferentes combinações de LEDs UVA, UVB e UVC. O estudo demonstrou que as combinações de UVC e UVB, sempre geraram efeito aditivo sobre a inativação dos microrganismos. As combinações de UVA de forma simultânea ou após UVC/UVB reduziram a inativação devido ao maior reparo dos microrganismos, causado pela fotorreativação induzida pela radiação UVA. No entanto, a exposição prolongada da radiação UVA, antes da UVC, melhorou de forma significativa a inativação de *E. coli*. Em relação ao vírus MS2, o efeito aditivo foi observado em várias combinações de comprimento de onda.

### **3.5 Desinfecção com o uso de Prata**

#### *Histórico*

A prata é utilizada, ao longo da história, como um processo de desinfecção útil para diversos propósitos. As aplicações medicinais e higiênicas são as que mais exploram seu poder desinfetante. Recipientes de prata eram utilizados na antiguidade para preservar água e vinho.

A prata em pó era recomendada por Hipócrates, pai da medicina moderna, como um elemento e era prescrito para o tratamento de úlceras. Até a criação dos antibióticos, os compostos de prata foram o principal medicamento contra a infecção de feridas na primeira guerra mundial. Nos dias de hoje, o nitrato de prata 1% é utilizado como solução para prevenção de oftalmia ocular em recém-nascidos e a sulfadiazina de prata é utilizada como pomada antibacteriana para o tratamento de queimaduras (CHEN, 2008).

Na desinfecção de água, o primeiro relato do uso de prata, veio do emprego de malhas de prata no elemento filtrante, seguido de tentativas de imobilização de prata em carbono ativado (MACHADO, 2012).

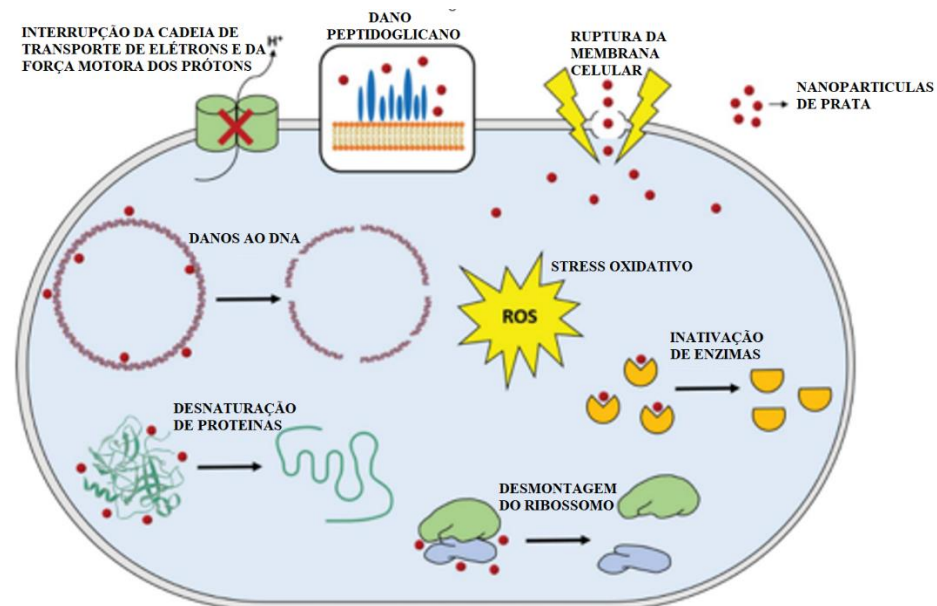
Com o desenvolvimento da nanociência, o uso da prata como método de desinfecção se tornou mais acessível. Em escala nano, a superfície de contato de uma grama de prata possui centenas de metros quadrados, o que aumenta de forma expressiva a capacidade bactericida deste elemento, pois ocorre aumento da liberação dos íons de prata e uma grande proporção de átomos fica em contato direto com o meio a ser desinfetado (CHEN,2008).



### Processo de desinfecção

Apesar de as nanopartículas de prata serem amplamente conhecidas como um elemento desinfetante, o processo de desinfecção exato ainda é buscado. De acordo com (ROY *et al.*, 2019), três processos de ação têm sido propostos, sendo estes: (i) danos à parede e à membrana celular, (ii) penetração e danos intracelulares e (iii) estresse oxidativo. A Figura 3.9, ilustra esses três processos.

**Figura 3.9-** Processos de ação antimicrobiana das nanopartículas de prata.



Fonte: Adaptado de ROY, 2019.

Os três processos de ação são brevemente explorados nos tópicos a seguir:

#### (i) Danos à parede celular

Os danos à parede celular são considerados o principal processo de ação das nanopartículas de prata (NPAg). A interação entre as NPAg e os microrganismos ocorre por eletrostática, onde ocorre a atração entre o microrganismo carregado negativamente e a nanopartícula carregada positivamente. Esta atração gera mudanças morfológicas na estrutura da membrana celular, o que leva à ruptura da permeabilidade e das funções respiratórias, devido à despolarização da membrana, o que, por fim, gera a ruptura da integridade celular e morte do microrganismo. Com a ruptura da parede celular, as proteínas, enzimas, DNA, íons, metabolitos e reservas de energia são perdidos para o meio (ROY *et al.*, 2019).

Também foi proposto que as NPAg poderiam interagir com proteínas da membrana externa, constituídas por complexos contendo átomos de oxigênio, fósforo, nitrogênio ou enxofre, os quais doam elétrons e causam alterações irreversíveis na estrutura da parede celular.

Outro processo proposto foi que os íons positivos de prata poderiam entrar na célula, através de proteínas de transporte das membranas, chamadas porinas, seletivas a cátions, e causar danos no interior das células (ROY *et al.*, 2019).

(ii) *Penetração e danos intracelulares*

A partir dos danos à membrana celular, as nanopartículas de prata podem penetrar no interior da célula e afetar funções vitais ao interagir com o DNA e com proteínas. Os íons de prata transformaram o estado do DNA de relaxado para condensado, neste novo estado, a molécula de DNA perde a capacidade de replicação. Estudos proteômicos demonstraram o efeito das NPAg nas proteínas e em suas sínteses. Os íons de prata liberados tendem a reagir com o grupo de proteínas tiol, encontrado na cisteína, essencial para o funcionamento da célula. Outros estudos com proteínas demonstraram que subunidades dos ribossomos também foram afetadas pelas nanopartículas de prata, que levaram à interrupção da biossíntese de proteínas (ROY *et al.*, 2019).

(iii) *Estresse oxidativo*

As células naturalmente possuem espécies reativas de oxigênio (EROs), como por exemplo, o ácido hipocloroso (HClO), o peróxido de oxigênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), radical hidroxila (OH), anión superóxido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) e o oxigênio singleto (O<sub>2</sub>). Em condições normais, a produção de EROs e a capacidade antioxidante da célula são equilibradas. No entanto, as nanopartículas de prata geram estresse oxidativo que favorece a oxidação. Quando o estresse oxidativo supera os processos de defesa, ocorrem danos à parede celular, às proteínas, aos lipídios e ao DNA (ROY *et al.*, 2019).

### ***Aplicação e eficiência***

As NPs de Ag são materiais importantes e comumente estudados para a desinfecção devido a suas propriedades características, como estabilidade química, maleabilidade, flexibilidade, alta condutividade elétrica e térmica, atividade catalítica, baixo custo de produção (referente a outras NPs) e ação antimicrobiana frente às bactérias, vírus, fungos e protozoários (DURÁN *et al.*, 2018).

As NPs de Ag são utilizadas na indústria de alimentos, têxtil, perfumaria, farmacêutica, agrícola, higiene, produtos de limpeza, tintas, eletroeletrônicos (DURÁN *et al.*, 2018). No setor ambiental, as NPs de Ag são utilizadas principalmente na desinfecção do ar e da água (KLEIN, 2017).

Nos últimos anos, muitos estudos foram realizados utilizando NPs de Ag na desinfecção de água para consumo. A Tabela 3.1, adaptada de Bahcelioglu *et al.* (2021) exibe compilado de propriedades e resultados de estudos de desinfecção de água que utilizam nanopartículas de prata.

**Tabela 3.1-** Propriedades e resultados de estudos de desinfecção de água que utilizaram nanopartículas de prata.

Material base	Vazão (ml/min)	<i>E. coli</i> (UFC/ mL)	Eficiência de desinfecção	Prata desprendida (ppb)	Referência
GAC revestido com AgNPs	<0.45	10 <sup>4</sup>	100%	29.8 ± 8.2	Biswas and Bandyopadhyaya (2016)
Prata modificada zeólitasclinoptilolita	2	10 <sup>9</sup>	100%	50–230	Akhigbe <i>et al.</i> (2016)
Revestimento de AgNP em papel de celulose	19800	10 <sup>8</sup>	3 log-100%	20-30	Praveena <i>et al.</i> (2016)
Polisulfona UF membranas impregnadas com AgNPs	NI	10 <sup>17</sup>	6–12 log	0–200	Mollahosseini <i>et al.</i> (2012)
Polisulfona UF membranas impregnadas com AgNPs	NI	10	2 log	4–34	Zodrow <i>et al.</i> (2009)

NI: Não Informado

Fonte: Adaptado de Bahcelioglu, 2021.

Diversos fatores influenciaram nos resultados obtidos na Tabela 3.1, como: morfologia da nanopartícula de prata, cultura utilizada, concentração de microrganismos, vazão, tensão

aplicada, concentração de Ag e características físico-químicas da água (pH, temperatura, turbidez, COT etc.) (Bahcelioglu *et al.*, 2021).

Um fator importante a ser considerado é a quantidade de prata liberada na água desinfetada. A Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021) não determina limites para a concentração máxima de água permitida. Segundo WHO (2017), não há informações suficientes para estabelecer uma diretriz específica de quantidade máxima de prata na água de consumo. No entanto, a fim de evitar doenças como a Argíria, causada pelo acúmulo de sais de prata no organismo, com depósito preferencial nos rins, baço e fígado, estima-se que a quantidade de prata inferior a 0,1 mg/L possa ser tolerada sem riscos para a saúde.

A Argíria é uma doença que causa a descoloração da pele e dos cabelos e pode deixar a pele azulada de forma permanente.

### **3.6 *E. coli* como indicador de risco microbiológico**

A água destinada ao consumo humano não deve possuir microrganismos causadores de doenças. Deste modo é necessário que sejam realizadas análises microbiológicas para identificar os possíveis patógenos.

Existem variadas metodologias para detectar os agentes causadores de contaminação microbiológica conhecidos. Realizar todas as análises demandaria muito tempo e elevado custo. Com o intuito de tornar as análises viáveis, é importante escolher certos microrganismos como indicativos de contaminação, para realização dos testes de forma otimizada.

De acordo com WHO (2017), os critérios para a determinação de um indicador de contaminação fecal, além de o mesmo não ser um patógeno são:

- a) Estar universalmente presente em fezes de animais e humanos em grande quantidade;
- b) Não se multiplicar nas águas de forma natural;
- c) Persistir na água de maneira semelhante aos patógenos fecais;
- d) Estar presente em maior número do que os patógenos fecais;
- e) Responder aos processos de tratamento de forma semelhante aos patógenos fecais;
- f) Ser prontamente detectado por métodos de cultura simples e econômicos.

Pelos critérios listados acima, a *E. coli* e, de forma alternativa, os Coliformes Totais se tornaram indicadores bem estabelecidos. O monitoramento de outros patógenos pode ser necessário em ocasiões específicas de surtos de doenças, nestes casos, indicadores adicionais

como bacteriófagos ou esporos bacterianos, podem ser usados como indicadores de patógenos persistentes (WHO, 2017).

A bactéria *Escherichia coli* é um bacilo gram-negativo anaeróbio facultativo, amplamente distribuído e habita o intestino de humanos e de animais de sangue quente (GOMES, 2016).

A *E. coli* geralmente é inofensiva, no entanto, no hospedeiro debilitado ou imunossuprimido, ou quando as barreiras gastrointestinais são violadas, mesmo as cepas normais podem causar infecção. Além disso, cepas como *E. coli* enteropatogênica, *E. coli* enterohemorrágica e *E. coli* enteroagregativa são adaptadas e desenvolveram capacidade de causar infecções em humanos saudáveis (NATARO; KAPER, 1998).

A portaria do ministério da saúde brasileiro GM/MS nº888, de 4 de maio de 2021, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, utiliza a *E. coli* e os Coliformes Totais como indicadores de contaminação fecal. Esta portaria, determina que os resultados das análises microbiológicas da água de consumo devem indicar a ausência de *E. coli* e de coliformes em 100mL de amostra.

Outras análises, como as que indicam a presença de (oo)cistos de *Cryptosporidium* e *Giardia* são exigidas, apenas se a média geométrica móvel dos valores seja igual ou superior a 1000 *Escherichia coli*/100mL.

Os métodos mais comuns para detecção e contagem de *E. coli* são: Colilert®, Colitag®, técnica de tubos múltiplos e técnica das membranas filtrantes. Estes métodos são padronizados no manual “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*” (APHA; WWA; WEF, 2012).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de tratamento Avançado e Reúso de Águas – LATAR, pertencente à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – EESC/USP, na realização de ensaios físico-químicos e microbiológicos. A pesquisa utilizou dois métodos de desinfecção, sendo um com LEDs UVA e outro com Tecido revestido com prata.

### 4.1 Reator de LEDs UVA

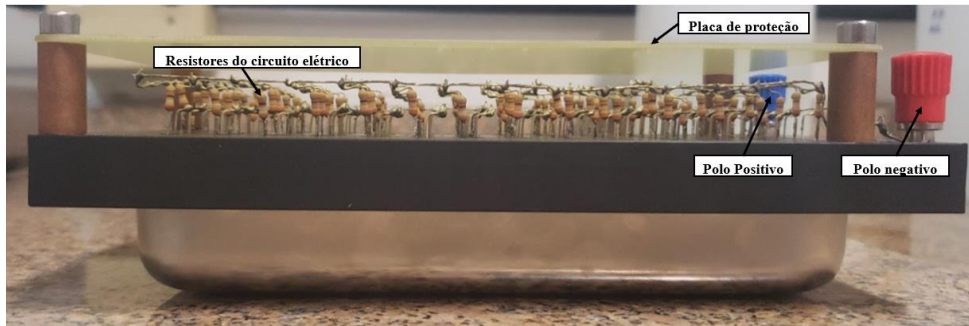
O reator de LEDs UVA (Figura 4.1 a Figura 4.4) foi construído em escala de bancada, para a realização de testes de desinfecção em laboratório. O sistema foi composto por uma bandeja de aço inox com volume útil de 250 ml e pela placa do reator, local em que os LEDs foram fixados. O reator foi confeccionado com 84 LEDs UVA e área útil de 145,14 cm<sup>2</sup>.

**Figura 4.1-** Bandeja de aço Inox e reator de LEDs UVA.



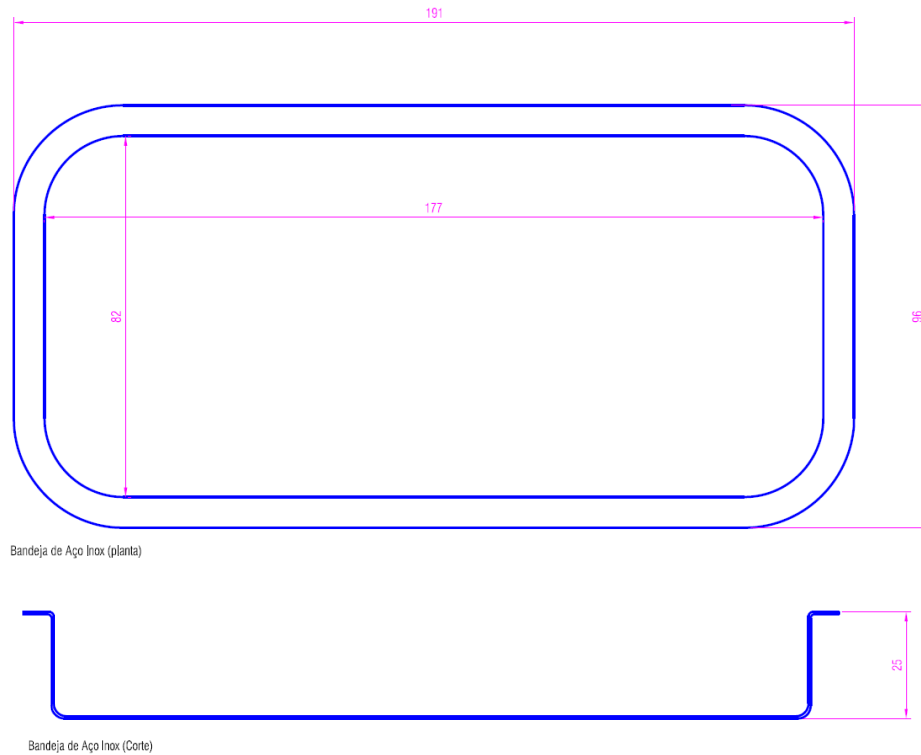
Fonte: Autora

**Figura 4.2-** Bandeja de aço Inox e reator de LEDs UVA.



Fonte: Autora

**Figura 4.3-** Detalhamento da bandeja de aço inox utilizada (planta e corte).



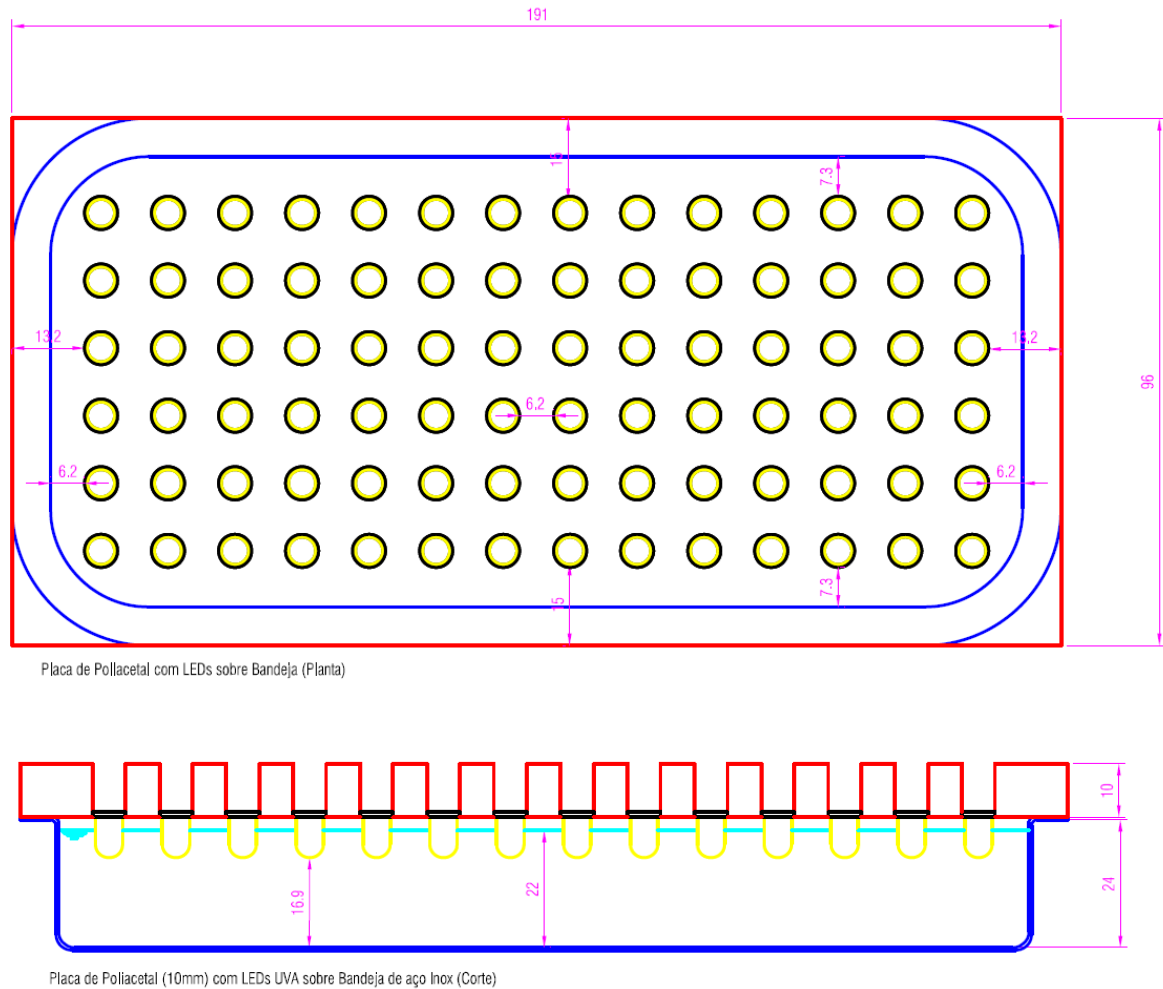
Bandeja de Aço Inox (planta)

Bandeja de Aço Inox (Corte)

\* medidas em milímetros

Fonte: Autora

**Figura 4.4-** Detalhamento do reator de LEDs UVA (Planta e corte)



\*medidas em milímetros

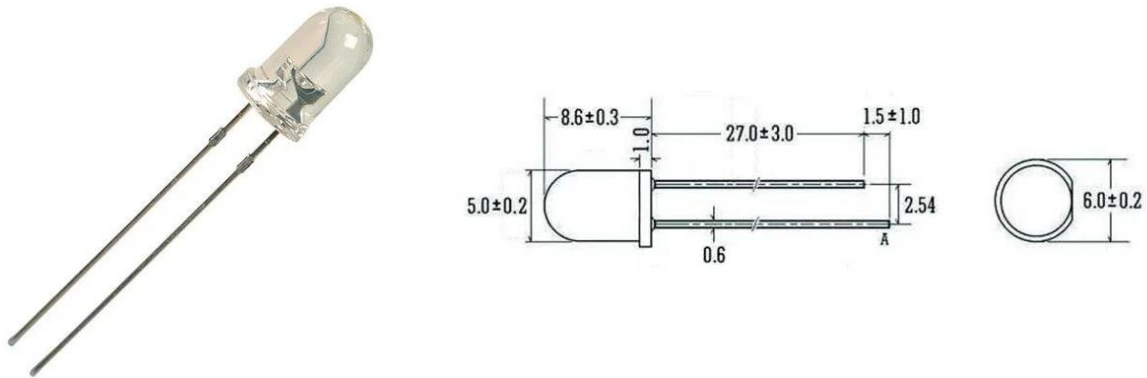
Fonte: Autora

#### 4.1.1 LEDs UVA

O modelo de LED utilizado foi o LED UVA de alto brilho monocromático K1322 do fabricante DUALCOM (Dualcom Comércio De Máquinas, Equipamentos E Serviços Ltda, PR., Brasil) (Figura 4.5). Este modelo emite radiação ultravioleta na faixa de 395 a 400 nm, com ângulo de visão de 20° a 30°, com potência de 60mW e intensidade luminosa na faixa de 300-400 mcd. A vida útil estimada pelo fabricante é de 100.000 horas.



**Figura 4.5-** LED UVA K1322 (Dimensões em milímetros)

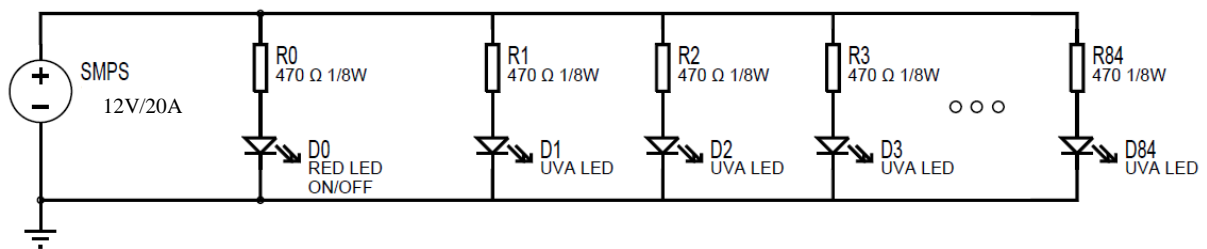


Fonte: DUALCOM.

Este modelo suporta temperatura de operação de  $-40^{\circ}$  a  $85^{\circ}$ . A corrente e a tensão de funcionamento informadas pelo fabricante são de 20mA e 3,0 a 3,2V, respectivamente.

O esquema elétrico foi montado com 84 resistores de  $470\ \Omega$  e 1/8W e 84 LEDs UVA em paralelo, conforme exibido na Figura 4.6. Foi utilizada uma fonte chaveada de 12V e 20A, para ligar o sistema. Os LEDs foram fixados em uma placa de poliacetal usinada com 84 perfurações que permitiram o encaixe dos LEDs UVA.

**Figura 4.6-** Esquema elétrico do Reator UVA.



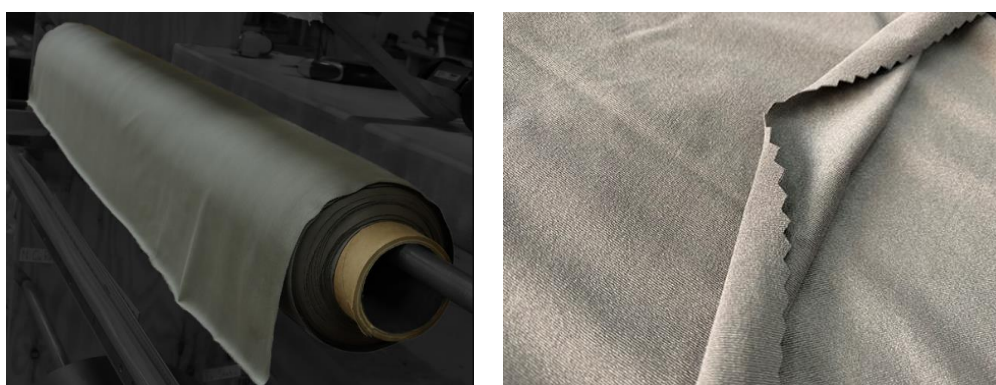
Fonte: Autora

Cabe destacar que os LEDs UVA foram selecionados para realizar esta pesquisa, devido ao seu baixo custo, o que os tornam viáveis para tecnologias descentralizadas em países em desenvolvimento. Conforme exibido no Anexo A, o valor de 1 LED UVA foi de R\$0,35, em 27 de outubro de 2020. Para fins de comparação, a cotação de um LED UVC (anexo B) foi de R\$ 234,43, em 14 de outubro de 2022, considerando a taxa de entrega e a taxa de importação máxima vigente de 60% sobre o valor do produto.

## 4.2 Tecido de prata

O tecido de prata utilizado nessa pesquisa foi constituído por materiais a base de polímeros revestido por prata pura (Figura 4.7). O produto é comercializado pelo nome de *Silver Fabric* (Tecido de prata) ou *Stretch Conductive Fabric* (Tecido condutor elástico) e pode ser adquirido via e-commerce, em diversas empresas, como a Less EMF<sup>®</sup> (Less EMF Inc., Latham, NY, EUA) , JW Textec<sup>®</sup> (Wujiang Jiawei Textile Tech Co., Wujiang, Jiangsu, China) etc.

Figura 4.7 - Tecidos revestidos com prata.



Fonte: a) Less EMF<sup>®</sup> b) JW Textec<sup>®</sup>

De acordo com o fabricante Less EMF<sup>®</sup>, os tecidos podem ser utilizados como curativos antibacterianos, como contatos de eletrodos (altamente condutor), como tecidos para diferentes tipos de vestuários. O fabricante JW Textec<sup>®</sup> destaca, além da capacidade antimicrobiana, pode-se considerar também as propriedades anti-odores e anti-radioativas.

A depender do fabricante e do modelo utilizado, os tecidos podem ter diversas características distintas. Não foi possível obter mais informações sobre o tecido utilizado, por se tratar de propriedade intelectual.

Neste estudo, foi avaliado o desempenho do tecido 100% revestido com prata, na inativação de *Escherichia coli* de forma isolada e combinado com o Reator de LEDs UVA. A metodologia dos ensaios desinfecção é apresentada nos itens 4.6.2 e 4.6.3. Também foi avaliada a influência do tecido na temperatura, turbidez, pH, condutividade elétrica, absorvância e transmitância na água de estudo.

### 4.3 Medição da Intensidade de Radiação e Determinação da Dosagem de Radiação Ultravioleta

A determinação da dose real de radiação UV, emitida pelo reator de LEDs UVA, com emissão no comprimento de onda de 395-400 nm, foi obtida através da realização de um ensaio actinométrico em triplicata, com o uso de solução de Oxalato Férrico. A curva de calibração e a medição da concentração de  $\text{Fe}^{2+}$  foi realizada no espectrofotômetro de bancada Macherey Nagel, modelo Nanocolor VIS II, através do método da ortofenantrolina descrito no *Standard Methods* (APHA; AWWA; WEF, 2012). As etapas do procedimento da medição de intensidade de radiação e determinação da dosagem de radiação UVA são descritas a seguir.

#### Primeira etapa – Construção da curva de calibração de $\text{Fe}^{2+}$

Soluções necessárias:

- $\text{Fe}^{2+}$  a 200mgFe(II)/L: esta solução foi obtida a partir da diluição de uma solução padronizada de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (278,02 g/mol) em 1 L de água deionizada.
- 1,10- Fenantrolina monoidrato a 0,1 % em água ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\text{H}_2\text{O}$ ): esta solução foi preparada dissolvendo 1,0 g de fenantrolina em 1,0 L de água a 80°C;
- Solução tampão (pH 3,5): em um balão volumétrico de 1 L, misturou-se 6,4 mL de acetato de sódio com 9,36 mL de sal de ácido acético e completou-se o volume com água deionizada.

Construção da curva:

Volumes de 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 1,0 e 1,5 de solução de  $\text{Fe}^{2+}$  (200mgFe/L) foram adicionados a balões volumétricos de 100 mL (Figura 4.8), em cada balão foi adicionado 5mL de solução tampão e 5 mL da solução de fenantrolina. O mesmo procedimento foi feito para a amostra branca (sem adição de  $\text{Fe}^{2+}$ ). As soluções foram homogeneizadas a cada adição de um reagente. A solução final permaneceu em repouso por 30 min para desenvolvimento de cor. A absorbância foi medida no comprimento de onda de 510 nm, com cubeta de quartzo de 1,0 cm de trajetória no espectrofotômetro de bancada Macherey Nagel modelo Nanocolor VIS II. O trabalho foi realizado na ausência de iluminação direta.

**Figura 4.8-** Balões volumétricos após leitura no espectrofotômetro.



Fonte: Autora

### **Segunda etapa – Preparo da solução actinométrica**

Em um balão volumétrico de 1000 mL foram adicionados 2,23 g de cristais de oxalato de Fe(II) (483,82 mol), 800mL de água deionizada, 100mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a 10 N e completado o volume final de 1000 mL com água deionizada. Este procedimento foi realizado em dois balões volumétricos totalizando o volume de 2 L. A solução foi mantida em agitação até a dissolução completa dos cristais (Figura 4.9). Todo o procedimento foi realizado em ambiente escuro.

**Figura 4.9-** Solução actinométrica em agitação.



Fonte: Autora

### **Terceira etapa – Procedimento do ensaio actinométrico**

Transferiu-se a solução actinométrica para o reator mantendo-se uma lâmina líquida de 2,2 cm, o que corresponde ao volume de 250mL por cada ensaio. Em cada ensaio, uma amostra foi coletada antes e após a irradiação de 5 min para determinação de concentração de Fe<sup>2+</sup>. Antes da leitura no espectrofotômetro, todas as amostras foram homogeneizadas por 5 s, por meio de um agitador de placa e barras magnéticas, o recipiente foi mantido em ambiente escuro através

do uso de papel alumínio. O ensaio foi realizado em triplicata.

#### Quarta etapa – Determinação da concentração de $Fe^{2+}$

A concentração de  $Fe^{2+}$  foi determinada segundo as recomendações do método da Fenantrolina do *Standard Methods* (APHA; AWWA; WEF, 2012). Adicionou-se em um balão volumétrico de 100 ml, 1,0 ml de solução irradiada, 5,0 ml de solução de 1,10-fenantrolina monoidratada a 0,1% em água, 5,0 ml da solução tampão e por fim, completou-se o volume de 100 ml com água deionizada. O mesmo procedimento foi realizado para amostra sem irradiação (branco). A solução foi homogeneizada e posteriormente deixada em repouso por 30 min, para desenvolvimento de cor. A absorbância foi medida no comprimento de onda de 510 nm, com cubeta de quartzo de 1,0 cm de trajetória no espectrofotômetro de bancada Macherey Nagel modelo Nanocolor VIS II.

A concentração e a taxa de formação de ferro foram calculadas segundo as Equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$C_{Fe^{2+}} = \frac{C_m \times V_{bv}}{V_a} \quad (4.1)$$

$C_{Fe^{2+}}$ : concentração de  $Fe^{2+}$  na solução de oxalato férrico irradiada com LEDs UVA (mg/L);

$C_m$ : concentração de  $Fe^{2+}$  obtida pela curva de calibração de determinação de  $Fe^{2+}$  (mg/L);

$V_{bv}$ : volume do balão volumétrico (mL);

$V_a$ : volume da alíquota tomada (mL).

$$TFF = \frac{[C_{Fe^{2+}}]}{T_{exp}} \times V_r \quad (4.2)$$

TFF: taxa de formação de ferro (mol/min);

$C_{Fe^{2+}}$ : concentração de  $Fe^{2+}$  na solução de oxalato férrico irradiada com LEDs UVA (mol/L);

$T_{exp}$ : tempo de exposição (min);

$V_r$ : volume do reator (L).

A dose e a intensidade de radiação UV foi calculada utilizando as equações 4.3 e 4.4, respectivamente.

$$D = \frac{[C_{Fe^{2+}}]_a - [C_{Fe^{2+}}]_0}{\phi_{Fe}} * 2,99 * 10^5 \quad (4.3)$$

D: dose de radiação UV de comprimento de onda de 395-400 nm (mWs/cm<sup>3</sup>);

|C<sub>Fe<sup>2+</sup></sub>|<sub>d</sub>: concentração molar de Fe<sup>2+</sup> depois da irradiação (mol/L);

|C<sub>Fe<sup>2+</sup></sub>|<sub>a</sub>: concentração molar de Fe<sup>2+</sup> antes da irradiação (mol/L);

φ<sub>Fe</sub>: rendimento quântico de produção de Fe<sup>2+</sup> no comprimento de onda de 400nm (1,25 íon grama/Einstein);

2,99 x 10<sup>5</sup>: fator de conversão de Einstein de fótons de comprimento de onda de 400 nm para mJ e de íon grama/L para íon grama/cm<sup>3</sup>.

$$Im = \frac{D * L}{t} \quad (4.4)$$

Im: intensidade média de radiação UV incidente na lâmina líquida de espessura L (mW/cm<sup>2</sup>);

D: dose de radiação UV de comprimento de onda de 395-400 nm (mWs/cm<sup>3</sup>);

L: espessura da lâmina líquida (cm);

t: tempo de exposição (s).

### Determinação das doses reais de radiação UVA

Após a determinação da intensidade média de radiação UVA (I<sub>0</sub>) incidente na superfície irradiada do reator, foram calculadas as doses reais de radiação UV, aplicadas nos ensaios de desinfecção UVA. As doses foram calculadas conforme as equações 4.5 e 4.6.

$$D_a = I_0 * t \quad (4.5)$$

$$D_{av} = \frac{I_0 * t}{L} * 0,278 \quad (4.6)$$

D<sub>a</sub>: dose aplicada (mWs/cm<sup>2</sup>)

I<sub>0</sub>: intensidade média de radiação UVA incidente da superfície irradiada(mW/cm<sup>2</sup>);

t: tempo de exposição à radiação UVA (s);

D<sub>av</sub>: dose aplicada volumétrica (Wh/m<sup>3</sup>).

L: espessura da lâmina líquida (cm);

0,2778: fator de conversão de mW para W, s para h e cm para m.

#### 4.4 Microrganismo de Estudo (*E. coli*)

##### 4.4.1 Cultura de *E. coli*

Os estoques mestres da cepa de *Escherichia coli* (cepa ATCC11229) foram inicialmente realizados com a retirada de uma alíquota das cepas reconstruídas de *E. coli*, cultivada a 37°C durante 18-24 horas, em placa contendo meio de cultura *Chromocult*®, a fim de se obter unidades formadoras de colônia (UFC). Após o período de crescimento da cultura, uma UFC foi selecionada, recuperada da placa e inoculada em 15 mL de meio de cultura líquido, Caldo Triptona de Soja (TSB) por 20h a 37°C. Em seguida 2,5 ml foram coletados do produto resultante e aliqotados em cinco criotubos nos quais posteriormente foram adicionados 0,5 mL de glicerol 50%. Os tubos foram armazenados a -80°C até o momento da utilização.

A cultura preparada previamente foi centrifugada (4000 rpm por 5 min) e o sobrenadante foi descartado. O pellet restante foi resuspenso em 5,0 mL de Solução salina tamponada com fosfato (PBS) e a nova suspensão foi aliqotada em criotubos (1 mL por tudo) e armazenadas a 4°C até o momento do uso. A inoculação de *E. coli* era realizada conforme a periodicidade dos ensaios, considerando o prazo máximo de 15 dias de validade.

##### 4.4.2 Detecção de *E. coli*

Para a realização dos ensaios de detecção de *Escherichia coli*, a água de estudo foi artificialmente contaminada pela cultura comercial, conforme descrito no tópico 4.6 e foi ativada com o meio nutriente e segundo o protocolo do fornecedor. As colônias de *E. coli* do inóculo e após os tratamentos (ATCC® 11229) foram contabilizadas pela técnica de filtração em membranas, utilizando o meio *Chromocult*®.

As amostras foram incubadas a 37°C por 18 a 24 horas. Após o período de incubação, os controles negativos foram verificados e as placas formadas foram contadas. Foram eleitas para a contagem, as placas (e suas triplicatas) cuja diluição tenha gerado entre 30 e 200 colônias.

#### 4.5 Água de Estudo

Para determinar o desempenho do reator de LEDs UVA e do tecido de Prata, foi utilizada água de estudo conforme a recomendação da Organização Mundial da Saúde, para a validação de tecnologias de tratamento de água em escala domiciliar (WHO, 2018). A matriz utilizada representa água de chuva ou água subterrânea e simula um modelo com condições reais de uso.

A água de estudo foi uma mistura de 2 L de água deionizada com 240 mg de bicarbonato de sódio e 4 mg de ácido tânico (Sigma Aldrich®) visando obter cloro  $< 0,05$  mg/L; pH  $7,0 \pm 0,5$ ; COT  $1,05 \pm 0,95$  mg/L; DQO 1,5 mg/L; turbidez  $< 1$  NTU; temperatura  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ; SDT  $275 \pm 225$  mg/L e alcalinidade  $100 \pm 20$  mg/L. A água de estudo foi preparada no dia da realização de cada ensaio.

A caracterização da água de estudo foi realizada em cada ensaio, através de uma amostra de 300 mL, e foi feita em função do pH, temperatura, alcalinidade total, condutividade elétrica, turbidez, absorvância, transmitância e cloro total.

A inserção de *Escherichia coli* na água de estudo foi realizada diretamente no Becker com 1,7 L ainda sob agitação. O volume acrescentado de *E. coli* em cada ensaio foi de 40 microlitros, visto que todas as culturas utilizadas obtiveram  $\pm 1 \times 10^{11}$  UFC/100 ml, de modo que a concentração final de *E. coli* na água de estudo permanecesse em  $\pm 1 \times 10^6$  UFC/100 ml. O preparo da água foi mantido em agitação por 10 min. Imediatamente após a homogeneização das bactérias, foi retirada uma amostra de 300 mL de água representando o tempo 0 min dos ensaios de desinfecção.

#### **4.6 Ensaios de Desinfecção**

Os ensaios de desinfecção com o reator de LEDs UVA e com o tecido de Prata foram realizados no Laboratório LATAR, em três condições distintas e em batelada.

1ª condição - Testes de desinfecção com o reator de LEDs UVA.

2ª condição - Testes de desinfecção com o reator de LEDs UVA combinado com o uso de tecido de prata.

3ª condição - testes de desinfecção com o uso do tecido de prata como processo único.

Nos tópicos 4.6.1 a 4.6.3, a seguir, são descritas a metodologia de cada tipo de ensaio de desinfecção realizado.

##### **4.6.1 Ensaios de desinfecção com o Reator UVA**

A bandeja de aço inox foi preenchida com 250 mL de água de estudo com inóculos de *E. coli*. Em seguida o sistema de desinfecção com LEDs UVA foi ligado e operado em batelada, sem agitação. Este procedimento foi realizado para os tempos de contato de 30, 60, 90 e 120 min. Os tempos de contato foram estimados conforme os resultados exibidos pelo estudos de Hamamoto *et al.* (2007), em que foram obtidas uma desinfecção superior a 5 Log com o tempo de contato de 75 minutos.



Após a finalização dos testes de cada tempo de contato, o reator foi esvaziado, lavado com Tween<sup>®</sup> 80 e desinfetado na câmara de esterilização UVC.

Um ensaio de desinfecção de controle foi realizado durante os mesmos tempos de contato e com os mesmos volumes em um Erlenmeyer coberto com papel alumínio, com a finalidade de representar o sistema de desinfecção com os LEDs desligados e para avaliar a uma possível morte natural das bactérias.

Todos os ensaios foram repetidos em três dias distintos. A *E. coli* foi contabilizada através de técnica de filtração por membranas de acordo com APHA, WWA e WEF (2012) descrita no tópico 4.4.2.

#### **4.6.2 Ensaio de desinfecção com o tecido de Prata**

Os ensaios de desinfecção com o tecido de prata foram realizados com 50 cm<sup>2</sup> de tecido cada. Os cortes do tecido foram lavados com água destilada e deixados em repouso de molho por 30 min, com a finalidade de remover as partículas desprendidas.

Em um Erlenmeyer de 500mL foram adicionados os 50 cm<sup>2</sup> de tecido e 250 mL de água de estudo com inóculos de *E. coli*, em 10<sup>6</sup> UFC/100mL. Este procedimento foi realizado para os tempos de contato de 15, 30, 45 e 60 min. Os tempos de contato foram determinados de modo a ser possível comparar com os resultados obtidos nos testes com o reator de LEDs UVA.

As amostras foram analisadas após a remoção do tecido de prata do Erlenmeyer, após os tempos de contato estipulados. Um ensaio de desinfecção de controle foi realizado durante os mesmos tempos de contato e com os mesmos volumes em um Erlenmeyer coberto com papel alumínio, com a finalidade de avaliar a possível ocorrência de morte natural das bactérias.

Todos os ensaios foram repetidos em três dias distintos. A *E. coli* foi contabilizada através de técnica de filtração por membranas de acordo com APHA, WWA e WEF (2012) descrita no tópico 4.4.2.

#### **4.6.3 Ensaio de desinfecção com o Reator UVA e o tecido de prata combinados**

A bandeja de aço inox foi preenchida com 250mL de água de estudo com inóculos de *E. coli*, em 10<sup>6</sup> UFC/100mL. Adicionou-se na bandeja 50 cm<sup>2</sup> de tecido de prata, preparada conforme tópico anterior. Em seguida o sistema de desinfecção com LEDs UVA foi ligado e operado em batelada, sem agitação. Este procedimento foi realizado para os tempos de contato de 15, 30, 45 e 60 min. As amostras foram analisadas após a remoção do tecido de prata do reator. Os tempos de contato foram determinados de modo a ser possível comparar com os resultados obtidos nos testes com o reator de LEDs UVA.

Os ensaios foram repetidos em três dias distintos. A *E. coli* foi contabilizada através de técnica de filtração por membranas de acordo com APHA, WWA e WEF (2012) descrita no tópico 4.4.2.

#### **4.7 Ensaios Físico-químicos**

Além dos ensaios de desinfecção, em todas as amostras, para todos os tempos de contato definidos nos ensaios de desinfecção, foram analisados os seguintes parâmetros físico-químicos: temperatura, pH, turbidez, condutividade elétrica, absorvância 254 nm e transmitância 254 nm.

O turbidímetro utilizado foi o modelo 2100N da *Hach Company*, o pHmetro foi o DM20 da Digimed e o condutivímetro foi o modelo DM32, também da Digimed. A absorvância e a transmitância foram medidas pelo espectrofotômetro de bancada Macherey Nagel modelo Nanocolor VIS II.

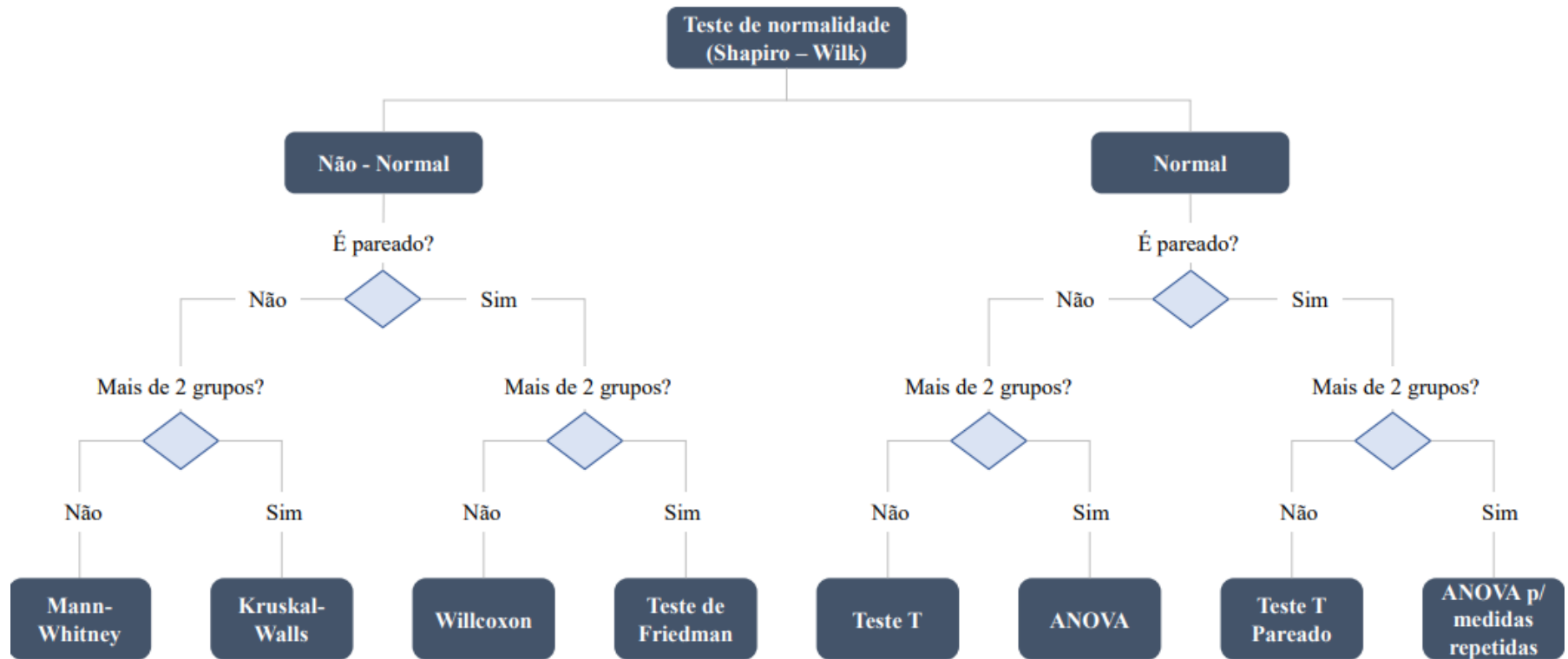
Os parâmetros foram avaliados seguindo os métodos descritos em APHA, WWA e WEF (2012). Além destes, também foram analisados a alcalinidade e o cloro total presente na água de estudo, antes da realização dos testes de desinfecção também de acordo com os métodos descritos em APHA, WWA e WEF (2012).

#### **4.8 Análises Estatísticas**

As análises estatísticas dos dados desta pesquisa foram realizadas com a utilização da ferramenta PAST (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001) e seguiram a lógica demonstrada na Figura 4.10. A normalidade dos dados foi verificada através do teste de SHAPIRO-WILK com intervalo de confiança de 95%. O nível de significância obtido foi de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Quando o valor de “p” encontrado foi maior que 0,05 se constatou a normalidade dos dados.

Após o teste de normalidade, a escolha do teste estatístico considerou a relação de dependência entre os grupos (pareados ou não pareados) e a quantidade de grupos disponíveis para a avaliação estatística. Assim como no teste de normalidade, considerou-se significância de 5%, ou seja, para valores de ‘p’ menores que 0,05, os conjuntos de dados foram tidos como diferentes.

**Figura 4.10** - Ordem e testes aplicados nas análises estatísticas



Fonte: Autora

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Intensidade de Radiação e Dosagem de Radiação Ultravioleta

A intensidade de radiação ultravioleta e a dose real aplicada pelo Reator UVA foram estimadas a partir dos dados do fabricante e medidas por actinometria química, os resultados são exibidos nos tópicos, 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3, a seguir.

#### 5.1.1 Intensidade máxima dos LEDs em função dos dados do fabricante

De acordo com informações do fabricante, a potência de um LED UVA é de 60mW. Sabendo-se que a área do reator sujeita a irradiação é de 145,14 cm<sup>2</sup>, a intensidade máxima de radiação UVA prevista é de 0,413mW/cm<sup>2</sup>/LED ou 34,73 mW/cm<sup>2</sup> para o conjunto de 84 LEDs. Destaca-se que a intensidade é dada pela energia total dividida pela área de irradiação.

#### 5.1.2 Intensidade de radiação medida por actinometria química

A intensidade de radiação ultravioleta em comprimento de onda de 395-400nm no interior do reator foi medida por actinometria com oxalato férrico, obtendo-se como resposta a intensidade média de radiação para o tempo de exposição da solução irradiada de 5 min.

Na Tabela 5.1, apresentam-se os resultados médios da taxa de formação de ferro dissolvido (TFF-Fe<sup>2+</sup>), dose de radiação UV (D), intensidade média de radiação UV a 395-400nm (I<sub>0</sub>). Os valores foram obtidos utilizando as equações 4.1 a 4.4.

**Tabela 5.1-** Resultados da taxa de formação de ferro, da dose de radiação e da intensidade de radiação do reator UVA.

Repetições	1	2	3	Unidade
Taxa de formação Fe <sup>2+</sup> (TFF)	3,43 x10 <sup>-4</sup>	3,47 x10 <sup>-4</sup>	3,37 x10 <sup>-4</sup>	Mol/min
Dose UVA (D)	1.635,82	1.656,26	1.611,29	mWs/cm <sup>3</sup>
Intensidade média de radiação (I <sub>0</sub> )	12,00	12,15	11,82	mW/cm <sup>2</sup>

Fonte: Autora

A Tabela 5.2 apresenta os resultados do cálculo da média, do desvio padrão e da diferença estatística entre os resultados encontrados para as três repetições de testes realizadas.

**Tabela 5.2** – Resultados da média, do desvio padrão e das diferenças estatísticas referente ao ensaio de medição de dose UVA.

	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>P valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Taxa de formação Fe<sup>2+</sup> (TFF)</b>	3,42E-04	5,03E-06	0,83987	Mol/min
<b>Dose UVA (D)</b>	1634,46	22,52	0,99982	mWs/cm <sup>3</sup>
<b>Intensidade média de radiação (I<sub>0</sub>)</b>	11,99	0,17	1,00000	mW/cm <sup>2</sup>

Fonte: Autora

A análise da diferença estatística foi realizada a partir do teste T de amostra única. Os resultados exibidos na Tabela 5.2 demonstram que não há diferença estatística significativa entre as três repetições realizadas.

Comparando-se as intensidades máximas dos LEDs previstas pelo fabricante com os dados de intensidades obtidos nos ensaios por actinometria, tem-se que a média da intensidade UVA/LED obtida por actinometria, 0,143mW/cm<sup>2</sup>/LED, foi menor ao valor informado pelo fabricante, que foi de 0,413mW/cm<sup>2</sup>/LED. Percentualmente, a perda de emissão foi 65%.

Em aplicações reais, a intensidade luminosa recebida, pode sofrer diversas interferências causadas, por exemplo, pela corrente utilizada, por perdas óticas, variações na montagem etc. Além destas, o fluxo luminoso é dependente da temperatura de operação dos LEDs. O excesso de calor, causado pela resistência à passagem da corrente elétrica, acelera a degradação da capacidade de produção de fótons (BIGONI, 2020). Segundo a empresa K2ON (RDF Comercial Eireli, SP.,Brasil), fornecedora de LEDs aplicações reais podem diminuir o valor do fluxo luminoso em até 75%.

### 5.1.3 Quantificação das doses reais de radiação UVA aplicada nos testes de desinfecção

A dose real volumétrica de radiação UVA, aplicada na água de estudo utilizada nos experimentos de desinfecção de microrganismos, foi quantificada com base nas equações 4.1 a 4.4 e estão apresentadas na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3-** Dose real aplicada por área e volumétrica do reator de LEDs UVA

<b>Tempo de exposição (min)</b>	<b>Dose real aplicada por área (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Dose real aplicada volumétrica (Wh/m<sup>3</sup>)</b>
<b>15</b>	29,97	1.362,16
<b>30</b>	59,93	2.724,31

Tempo de exposição (min)	Dose real aplicada por área (Wh/m <sup>2</sup> )	Dose real aplicada volumétrica (Wh/m <sup>3</sup> )
45	89,90	4.086,47
60	119,87	5.448,62
90	179,80	8.172,94
120	239,74	10.897,25

Fonte: Autora

Para o cálculo, utilizou-se a intensidade média aplicada pelo reator medida por actinometria (11,99 mW/cm<sup>2</sup>) para a lâmina líquida de 2,2 cm.

Nos estudos realizados por Hamamoto *et al.* (2007), que utilizaram LEDs UVA (365nm), a dose necessária para reduzir *Escherichia coli* em 5 log foi de 875Wh/m<sup>2</sup>. Para ser possível atingir esta dose, com o reator utilizado nesta pesquisa, seriam necessárias mais de 7 horas de tempo de contato, o que inviabilizaria o uso do reator de bancada, devido ao aquecimento da amostra e ao baixo volume desinfetado neste tempo. No entanto, a dose necessária não pode ser comparada de forma direta, visto que o comprimento de onda utilizado nos LEDs do referido trabalho foi superior (395-400nm). Não foram encontrados estudos de desinfecção de *E. coli* com a utilização de LEDs de 395- 400nm como processo único.

## 5.2 Caracterização da água de estudo

Após o preparo da água de estudo, a cada dia de ensaio, foram realizadas análises para caracterizar os parâmetros físicos e químicos. A Tabela 5.4 contém valores médios e o desvio padrão dos parâmetros analisados, comparados com os valores recomendados pela WHO (2018) para representar água de chuva ou subterrânea de alta qualidade criada em laboratório, para avaliar sistemas de tratamentos de água domiciliares.

**Tabela 5.4-** Parâmetros analisados da água de estudo

Parâmetro	Média ± Desvio Padrão	GTW* WHO (2018)	Unidade
Temperatura	23,41 ± 1,81	20 ± 3	°C
pH	7,42 ± 0,35	7 ± 0,5	-
Turbidez	0,15 ± 0,04	<1	NTU
Condutividade	142,10 ± 11,85	NE	µs/cm
Absorbância (254nm)	0,05 ± 0,01	NE	-
Transmitância (254nm)	89,94 ± 2,81	NE	-
Alcalinidade	78,29 ± 3,29	100 ± 20	mg/L CaCO <sub>3</sub>
Cloro Total	0,01 ± 0,01	<0,05	mg/L

Legenda: NE = não especificado; \* *General Test Water*.

Fonte: Autora.

A média das temperaturas da água de estudo ultrapassou em 0,41°C a temperatura recomendada por WHO (2018), no entanto, como esta pequena variação não produz interferência significativa nesta pesquisa, optou-se por não resfriar a água de estudo produzida. O pH e a turbidez estão dentro dos valores requeridos por WHO (2018).

A alcalinidade da água de estudo produzida teve média 78,29 mg/L CaCO<sub>3</sub>, 1,71 mg/L de CaCO<sub>3</sub> a menos que o valor recomendado por WHO (2018). No entanto, o documento de referência informa que, como a alcalinidade é destinada a tamponar o pH, os valores analisados podem desviar do intervalo recomendado. Os valores de cloro foram analisados conforme recomendações de WHO (2018), pois certos valores podem causar interferência nos resultados das análises. Todos os valores de cloro se encontraram abaixo dos limites recomendados.

Outros parâmetros recomendados para a GTW são o Carbono Orgânico total (COT) e os sólidos dissolvidos totais (SDT). O COT não foi medido (o equipamento do laboratório estava danificado), no entanto, o valor de carbono orgânico foi ajustado a partir da adição de ácido tânico na água de estudo de modo a obter valores na faixa recomendada de 1,05 ± 0,95 mg/L. A medição da condutividade elétrica e transmitância não são indicados por WHO (2018), no entanto foram avaliados nesta pesquisa. Visto que a Legislação brasileira exige a medição da condutividade elétrica para mananciais subterrâneos (BRASIL, 2021).

### 5.3 Qualidade da água desinfetada com o Reator de LEDs UVA

#### *Visão geral dos parâmetros físico-químicos*

Os valores gerais dos parâmetros físico-químicos referentes à água após a desinfecção com reator de LEDs UVA estão na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5-** Parâmetros gerais após desinfecção com o reator de LEDs UVA

Parâmetro	Média ± Desvio Padrão					Unidade
	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	
Tempo						
Temperatura	22,23 ± 1,48	33,10 ± 1,49	35,90 ± 2,04	42,20 ± 1,73	43,20 ± 0,82	°C
pH	7,20 ± 0,18	7,71 ± 0,33	7,29 ± 0,42	7,80 ± 0,09	7,89 ± 0,15	-
Turbidez	0,18 ± 0,10	0,21 ± 0,10	0,21 ± 0,07	0,16 ± 0,02	0,14 ± 0,04	NTU
Condutividade elétrica	155,73 ± 9,57	152,79 ± 6,88	152,21 ± 7,17	160,74 ± 13,43	156,71 ± 12,79	µs/cm
Absorbância (254nm)	0,05 ± 0,01	0,06 ± 0,00	0,06 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,08 ± 0,01	-

Parâmetro	Média ± Desvio Padrão					Unidade
	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	
Tempo						
Transmitância (254nm)	89,37 ± 3,07	84,87 ± 3,06	87,63 ± 1,32	85,50 ± 1,23	85,13 ± 1,30	-

Fonte: Autora.

Os parâmetros físico-químicos que obtiveram alterações estatisticamente significativas nas médias desta etapa dos testes de desinfecção, com a utilização do reator de LEDs UVA, foram a temperatura e o pH. A temperatura e o pH obtiveram valores crescentes conforme o aumento do tempo de exposição ao reator UVA ligado. As discussões sobre o aumento da temperatura e do pH se encontram nos tópicos 5.7.1 e 5.7.3, respectivamente.

#### 5.4 Qualidade da água desinfetada com o Reator de LEDs UVA combinado com o tecido de prata

##### *Visão geral dos parâmetros físico-químicos*

Os valores gerais dos parâmetros físico-químicos referentes à água após a desinfecção com reator de LEDs UVA combinado com o tecido de prata estão dispostos na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6** - Parâmetros gerais após desinfecção com o reator de LEDs UVA combinado com a mata de prata.

Parâmetro	Média ± Desvio Padrão					Unidade
	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	
Tempo						
Temperatura	23,75 ± 1,49	27,73 ± 1,42	30,77 ± 0,55	36,30 ± 3,41	38,77 ± 1,38	°C
pH	7,87 ± 0,19	7,92 ± 0,19	8,00 ± 0,19	7,92 ± 0,11	7,97 ± 0,13	-
Turbidez	0,16 ± 0,03	0,30 ± 0,04	0,67 ± 0,16	1,15 ± 0,27	1,50 ± 0,43	NTU
Condutividade elétrica	139,75 ± 4,58	137,49 ± 1,32	135,02 ± 4,10	142,69 ± 6,39	143,84 ± 5,19	µs/cm
Absorbância (254nm)	0,05 ± 0,00	0,05 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,07 ± 0,02	0,08 ± 0,01	-
Transmitância (254nm)	89,12 ± 1,60	87,43 ± 3,06	87,73 ± 1,62	84,83 ± 3,15	83,93 ± 2,36	-

Fonte: Autora.

Os parâmetros físico-químicos que obtiveram alterações estatisticamente significativas nas médias desta etapa dos testes de desinfecção, com a utilização do reator de LEDs UVA combinados com o tecido de prata, foram a temperatura e a turbidez. A temperatura e a turbidez obtiveram valores crescentes conforme o aumento do tempo de exposição ao reator UVA



ligado. As discussões sobre o aumento da temperatura e da turbidez se encontram nos tópicos 5.7.1 e 5.7.2, respectivamente.

## 5.5 Qualidade da água desinfetada com o tecido de prata

### *Visão geral dos parâmetros físico-químicos*

Os valores gerais dos parâmetros físico-químicos referentes à água após a desinfecção com o tecido de prata estão dispostos Tabela 5.7.

**Tabela 5.7-** Parâmetros gerais após desinfecção com o tecido de prata

Parâmetro	Média ± Desvio Padrão					Unidade
	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	
<b>Tempo</b>						
<b>Temperatura</b>	23,75 ± 1,49	23,20 ± 1,15	23,03 ± 1,17	23,90 ± 1,35	24,50 ± 0,60	°C
<b>pH</b>	7,87 ± 0,19	7,97 ± 0,14	7,88 ± 0,23	7,77 ± 0,17	7,80 ± 0,20	-
<b>Turbidez</b>	0,16 ± 0,03	0,28 ± 0,09	0,22 ± 0,05	0,26 ± 0,04	0,24 ± 0,06	NTU
<b>Condutividade elétrica</b>	139,75 ± 4,58	137,51 ± 1,95	135,74 ± 0,49	140,79 ± 5,97	139,85 ± 7,24	µs/cm
<b>Absorbância (254nm)</b>	0,05 ± 0,00	0,05 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,01	-
<b>Transmitância (254nm)</b>	89,12 ± 1,60	87,50 ± 2,25	87,90 ± 1,80	87,43 ± 2,12	87,00 ± 1,97	-

Fonte: Autora.

Nesta etapa nenhum parâmetro físico-químico sofreu alteração estatística significativa nas médias, apesar do leve aumento dos valores de turbidez. As discussões sobre o aumento da turbidez se encontram no tópico 5.7.2.

## 5.6 Diferenças estatísticas

Os valores das diferenças estatísticas, com o p-valor para todos os parâmetros, entre as três repetições, de cada tipo de teste, são exibidos na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8-** p-valor para os testes estatísticos aplicados entre as repetições realizadas.

Parâmetro	Testes		
	Reator UVA	Reator UVA combinado com Tecido de Prata	Tecido de Prata
Temperatura	0,9359	0,9596	0,8157
pH	0,6651	0,1246	0,2326
Turbidez	0,1182	0,8234	0,6979
Condutividade elétrica	6,32E-05*	0,2186	0,157
Absorbância (254nm)	0,55	0,5646	0,3305
Transmitância (254nm)	0,932	0,4423	0,762
<i>E. coli</i>	0,9402	0,6955	1
<i>E. coli (branco)</i>	0,01787*	1,58E-05*	1,58E-05*

\* Valores estatisticamente diferentes (p valor abaixo de 0,05).

Fonte: Autora.

Ao analisar a Tabela 5.8 pôde-se verificar que para a maioria dos parâmetros não houve diferença estatística significativa entre as repetições dos testes realizados. Os únicos valores que geraram p valor inferior a 0,05 foram os testes relacionados à condutividade da água desinfetada apenas pelo Reator UVA e o valor de *E. coli* dos testes em branco. Quanto ao valor diferente da condutividade, provavelmente se deu por um erro de calibração do equipamento, visto que os valores de todos os outros testes se mantiveram na mesma faixa. Quanto ao valor dos testes de *E. coli* (branco), os quais visaram avaliar a morte natural das bactérias, apesar de serem exibidos como estatisticamente diferentes, todos os testes apresentaram cerca de 6 logs de *E. coli*, como pode ser observado na Figura 5.12 e na Figura 5.14.

Os valores das diferenças estatísticas, com o p-valor para cada parâmetro, entre os diferentes tempos de contato são exibidos na Tabela 5.9, para os três tipos de testes de desinfecção realizados.

**Tabela 5.9-** p-valor para os testes estatísticos aplicados entre os diferentes tempos de contato

Parâmetro	Testes		
	Reator UVA	Reator UVA combinado com Tecido de Prata	Tecido de Prata
Temperatura	0,015830*	0,000005*	0,429900
pH	0,018010*	0,508600	0,736900
Turbidez	0,373800	0,000052*	0,104400
Condutividade elétrica	0,399200	0,265500	0,667900
Absorbância (254nm)	0,200000	0,070800	0,708700
Transmitância (254nm)	0,166200	0,350700	0,605210
<i>E. coli</i>	0,000002*	0,142270	0,142270
<i>E. coli (branco)</i>	0,669800	0,979000	0,979000

\* Valores estatisticamente diferentes (p valor abaixo de 0,05).

Fonte: Autora.

A Tabela 5.9 exibe os parâmetros que obtiveram diferença estatística significativa ao longo da mudança dos tempos de contato. Apresentou-se diferença para a desinfecção com reator UVA na temperatura, no pH e nos valores de *E. coli*, para a desinfecção do reator UVA combinado com o tecido de prata apresentou-se diferença na temperatura e na turbidez. Não houve diferença estatística significativa entre os diferentes tempos de contato avaliados, para os testes da configuração que utilizou apenas o tecido de prata (Excluindo-se tempo 0, nos resultados de *E. coli*). A discussão sobre as alterações nos parâmetros de qualidade se encontra nos tópicos 5.7 e 5.8, a seguir.

Os valores das diferenças estatísticas, com o p-valor para cada parâmetro entre os três diferentes modos de desinfecção deste estudo, em todos os tempos de contato similares, estão na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10**– p-valor de interesse da diferença estatística entre as três condições de desinfecção realizadas

Tempo (min)	UVA x (UVA e Tecido)			UVA x Tecido			(UVA e Tecido) x tecido				
	0	30	60	0	30	60	0	15	30	45	60
<b>Temperatura</b>	0,1699	0,0640	0,1142	0,1699	0,0008*	0,0008*	-	0,0126*	0,0005*	0,0042*	0,0001*
<b>pH</b>	0,0028	0,2217	0,0765	0,0028*	0,4983	0,1260	-	0,8143	0,4408	0,3041	0,3758
<b>Turbidez</b>	0,3356	0,0147*	0,0070*	0,3356	0,8323	0,5992	-	0,6378	0,0109*	0,0051*	0,0075*
<b>Condutividade</b>	0,0538	0,0184*	0,1767	0,0538	0,0126*	0,1035	-	0,8976	0,7755	0,7258	0,4814
<b>Absorbância (254nm)</b>	0,5938	0,9330	0,0931	0,5938	0,7645	0,8473	-	0,3687	0,7577	0,3121	0,0809
<b>Transmitância (254nm)</b>	0,9506	0,2133	0,6674	0,9506	0,2248	0,0768	-	0,6531	0,9109	0,3012	0,1588
<b><i>E. coli</i></b>	0,0426*	Diferente	Diferente	0,0426*	Diferente	Diferente	-	0,3458	1,0000	1,0000	1,0000
<b><i>E. coli (branco)</i></b>	0,5749	0,4125	0,0842	0,5749	0,4125	0,0842	-	-	-	-	-

\* Valores estatisticamente diferentes (p valor abaixo de 0,05).

Diferente: Valores que não permitiram a aplicação de testes estatísticos, devido a comparação com os resultados zerados gerados pelos testes de desinfecção com o tecido revestido com prata.

Fonte: Autora

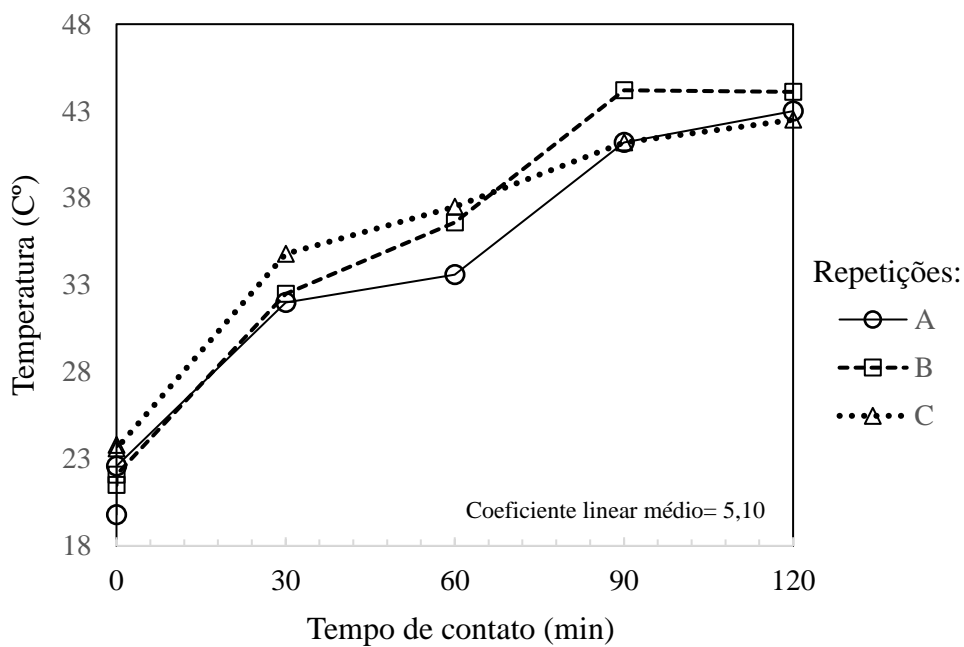
A discussão sobre as diferenças estatísticas significativas se encontra nos tópicos 5.7 e 5.8, a seguir.

## 5.7 Parâmetros Físico-químicos

### 5.7.1 Temperatura

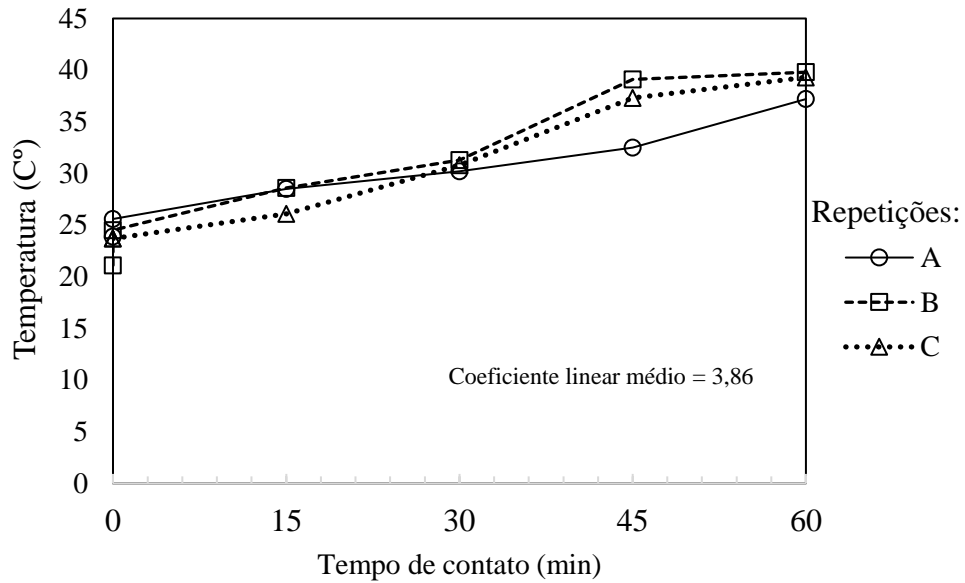
O monitoramento da temperatura da água de estudo antes e após os tempos de contato das três etapas de testes de desinfecção realizadas neste estudo, estão dispostos nas Figura 5.1 a 5.3. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados.

**Figura 5.1-** Variação de temperatura da água - Reator de LEDs UVA.



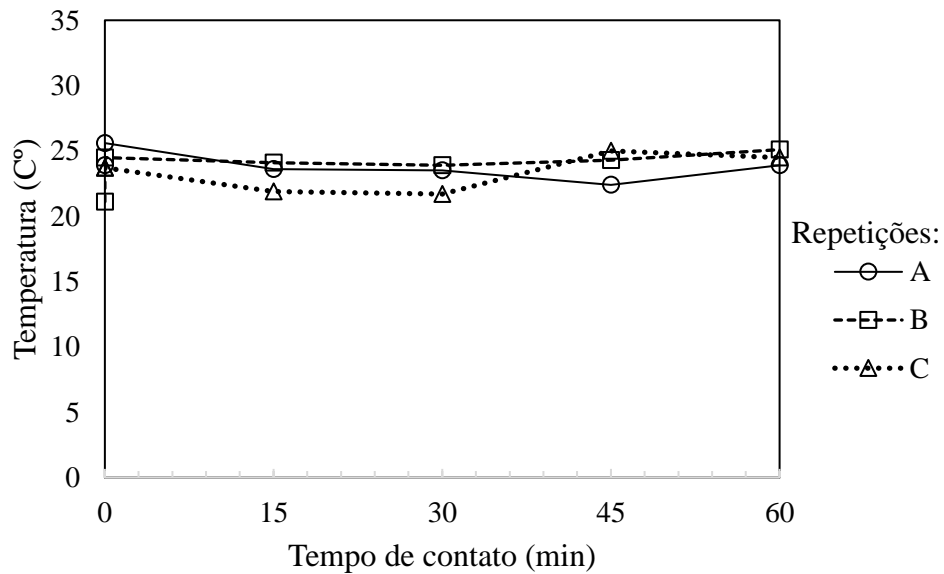
Fonte: Autora

**Figura 5.2-** Variação de temperatura da água - Reator de LEDs UVA combinado com o Tecido de Prata.



Fonte: Autora

**Figura 5.3-** Variação de temperatura da água - Tecido de Prata.



Fonte: Autora

A temperatura da água desinfetada pelo reator de LEDs UVA, como processo de desinfecção único e combinado com o tecido de prata, obteve valores crescentes conforme o aumento do tempo de exposição ao reator UVA. O aumento da temperatura foi causado pelo aquecimento dos resistores utilizados no circuito elétrico dos LEDs e ocorre devido ao efeito Joule, que consiste na conversão de energia elétrica em calor, devido às colisões entre os elétrons e os átomos que compõem a estrutura do resistor (JEWETT; SERWAY, 2004).

A taxa de variação média da temperatura foi de 5,10 para desinfecção apenas com reator e de 3,86 para desinfecção combinada, sem diferença estatística significativa entre os dois modos de desinfecção (p valor= 0,0640 e 0,1142), para os tempos de contato de 30 e 60 min, respectivamente.

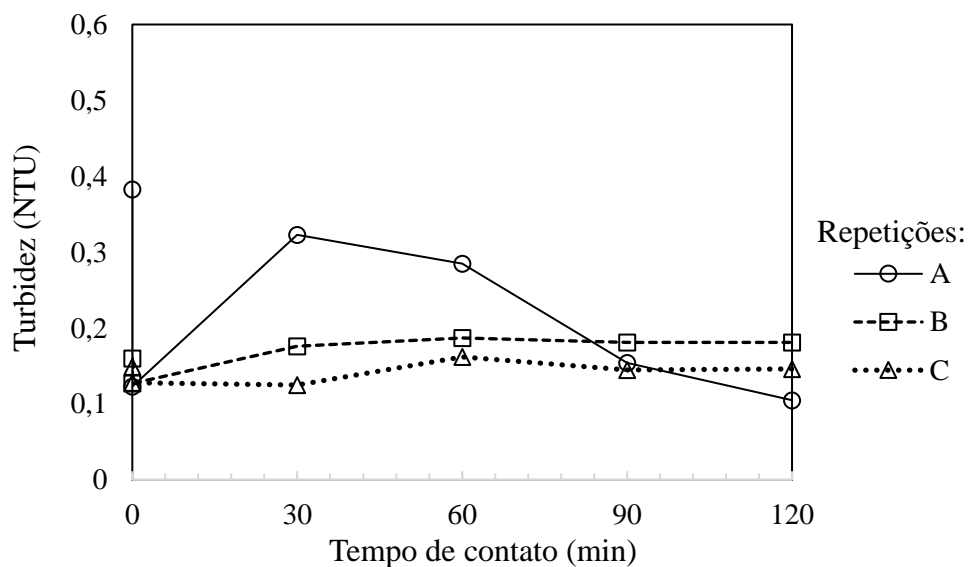
A maior parte dos testes de desinfecção com LEDs são realizados com LEDs do tipo UVC, os quais necessitam de tempos de contato de poucos segundos. Segundo experimentos de Jarvis *et al.* (2019), o tempo de contato curto evitou o aumento da temperatura pela exposição ao reator utilizado. Não foram encontrados registros de estudos com variação de temperatura da água através da desinfecção com LEDs UVA.

A temperatura da desinfecção com o tecido de prata ficou compreendida em  $23,69 \pm 1,21$  °C, não demonstrando diferença estatística significativa entre si (p valor = 0,8157). O tecido de prata não interferiu na temperatura da água testada.

### 5.7.2 Turbidez

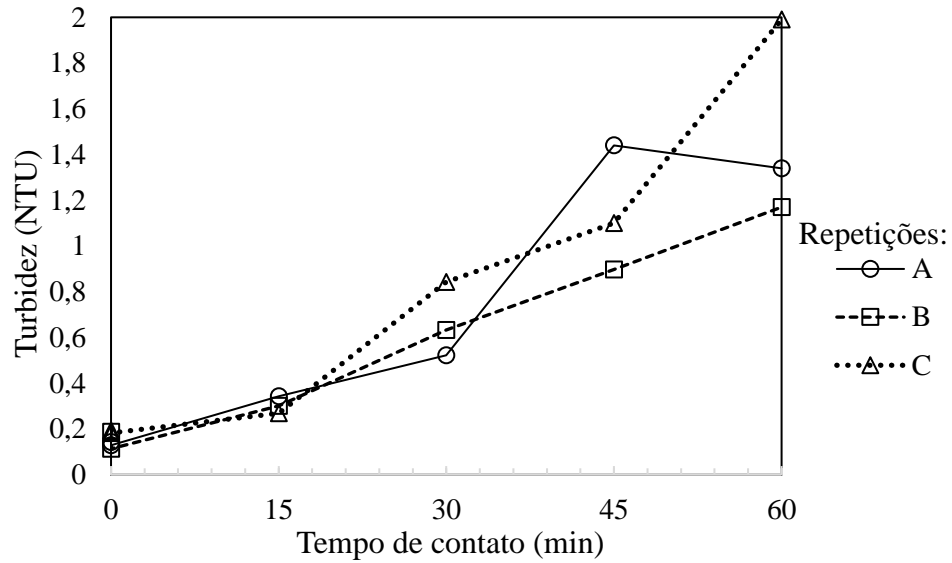
O monitoramento da turbidez da água de estudo antes e após os tempos de contato das três etapas de testes de desinfecção, realizados neste estudo, estão na Figura 5.4 a Figura 5.5. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados.

**Figura 5.4-** Variação de turbidez da água - Reator de LEDs UVA.



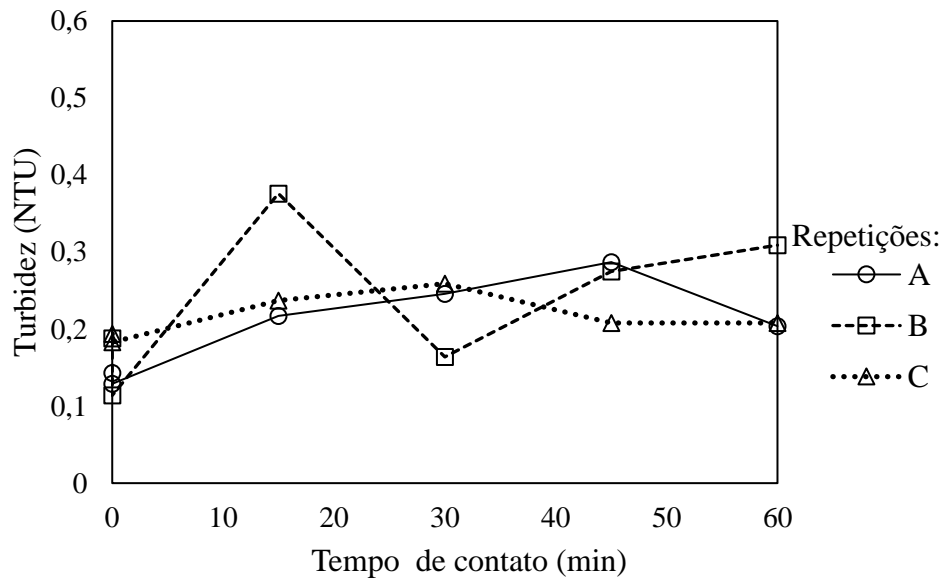
Fonte: Autora

**Figura 5.5-** Variação de turbidez da água - Reator de LEDs UVA combinado com o tecido de Prata.



Fonte: Autora

**Figura 5.6-** Variação de turbidez da água - Tecido de Prata.



Fonte: Autora

Conforme observado na Figura 5.4, a desinfecção com o reator de LEDs UVA não gerou diferença significativa na turbidez da água, entre os diferentes tempos de contato, o que pode ser confirmado pela análise estatística ( $p$  valor = 0,3738).

Para os valores referentes à desinfecção com o tecido de prata (Fonte: Autora

Figura 5.6), observa-se diferença nos valores de turbidez entre o tempo 0 e os demais tempos de contato da mesma magnitude, sem demonstrar variação na turbidez ao longo do



aumento do tempo de contato. A análise estatística confirma este padrão na diferença entre os demais tempos de contato pelo valor  $p = 0,7527$ .

O aumento da turbidez pode ser relacionado ao desprendimento de partículas sólidas do tecido de prata, em contato com a água de estudo. Na pesquisa realizada por Sobrinho (2020), também foi possível observar o aumento da turbidez da água causado pelo mesmo tecido de prata 100%, neste estudo, a turbidez aumentou de 0,135 a 5,36 NTU, ao se utilizarem 25 cm<sup>2</sup> de tecido de prata em um tempo de contato de 360 min e volume de 200mL de água.

Nos testes com o reator de LEDs UVA combinados com o uso do tecido de prata (Figura 5.5), pôde-se observar que os valores de turbidez também foram crescentes ao longo do tempo, porém o aumento de turbidez foi superior ao dos testes apenas com o tecido de prata. Este aumento pode ter sido acentuado pela ação do aumento da temperatura e pela incidência de radiação UVA sobre o tecido revestido com prata. Estes agentes podem ter proporcionado aceleração na degradação do tecido utilizado. Fabricantes como *Less EMF*® recomendam que a temperatura utilizada neste tipo de tecido, seja inferior a 40°, para que seja evitada a degradação do tecido e a perda de suas propriedades.

Quanto a comparação dos valores de turbidez entre as três etapas de desinfecção, a estatística mostrou que existe diferença significativa na turbidez entre os testes UVA e UVA conjugado com tecido de prata ( $p$  valor = 0,0147 e 0,0070) e para os testes UVA combinado com tecido e os testes apenas com tecido ( $p$  valor = 0,6378, 0,0109, 0,0051 e 0,0075), para os tempos de contato de 15, 30, 45 e 60 min. Não houve diferença estatística significativa no valor de turbidez entre os testes apenas com reator UVA comparados com apenas com o tecido ( $p$  valor = 0,8326 e 0,5992), para os tempos de contato de 30 e 60 min.

Conclui-se que os testes realizados apenas com o tecido de prata de forma isolada afetaram menos à qualidade da água de estudo, se comparado ao uso combinado com o Reator. Apesar dos valores de turbidez encontrados, neste caso, serem inferiores ao limite (1,0 NTU) especificado pela Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), é importante a realização de análises para identificar se as partículas desprendidas na água são danosas à saúde humana.

### **5.7.3 Demais parâmetros físicos de qualidade da água**

Os demais parâmetros de qualidade da água, como pH, condutividade elétrica, absorvância e transmitância são abordados nesse tópico.

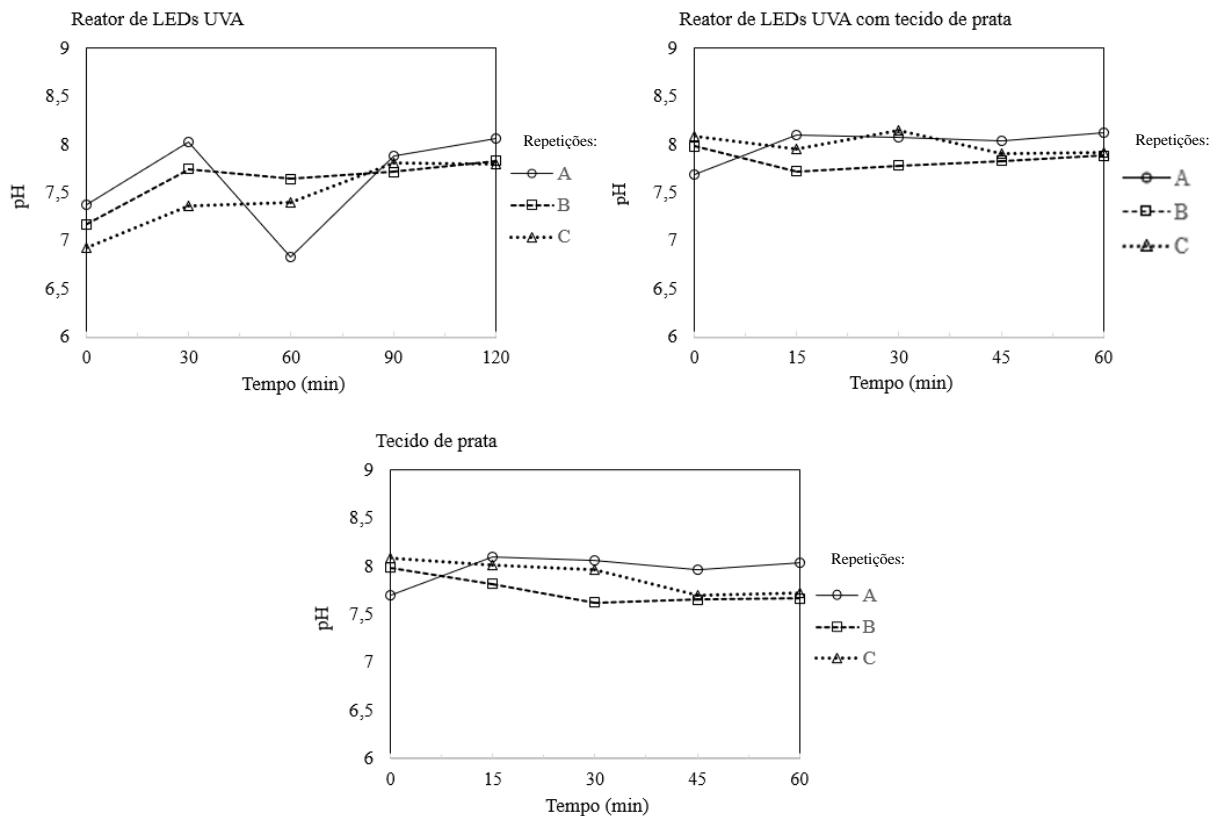
O pH das amostras de água desinfetada pelo reator de LEDs UVA ficou compreendido em  $7,51 \pm 0,37$ , apresentando diferença estatística significativa entre os diferentes tempos de contato ( $p$  valor =  $0,01801$ ), ocorreu leve aumento dos valores de pH ao longo do tempo.

O pH das amostras de água desinfetada pelo tecido de prata ficou compreendido em  $7,86 \pm 0,18$ , não apresentando diferença significativa entre os tempos de contato ( $p$  valor =  $0,737$ ).

O pH das amostras de água desinfetada pelo reator de LEDs UVA combinado com o tecido de prata ficou compreendido em  $7,93 \pm 0,16$ , não apresentando diferença significativa entre os diferentes tempos de contato ( $p$  valor =  $0,5086$ ).

Quando comparado o pH entre os três tipos de desinfecção não foi apresentada diferença estatística significativa (Tabela 5.10). O pH de todas as amostras apresentaram valores dentro do recomendado, para água de consumo humano, pela legislação brasileira Portaria GM/MS 888 Brasil (2021), ou seja, dentro da faixa de 6,0 a 9,0. A Figura 5.7, apresenta o gráfico dos valores de pH dos três tipos de testes realizados. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados.

**Figura 5.7-** Valores de pH nos três tipos de testes realizados.



Fonte: Autora

A condutividade elétrica da água desinfetada pelo reator de LEDs UVA ficou compreendida em  $155,65 \pm 9,35 \mu\text{S}/\text{cm}$ , não apresentando diferença significativa entre os diferentes tempos de contato (p valor =0,3992).

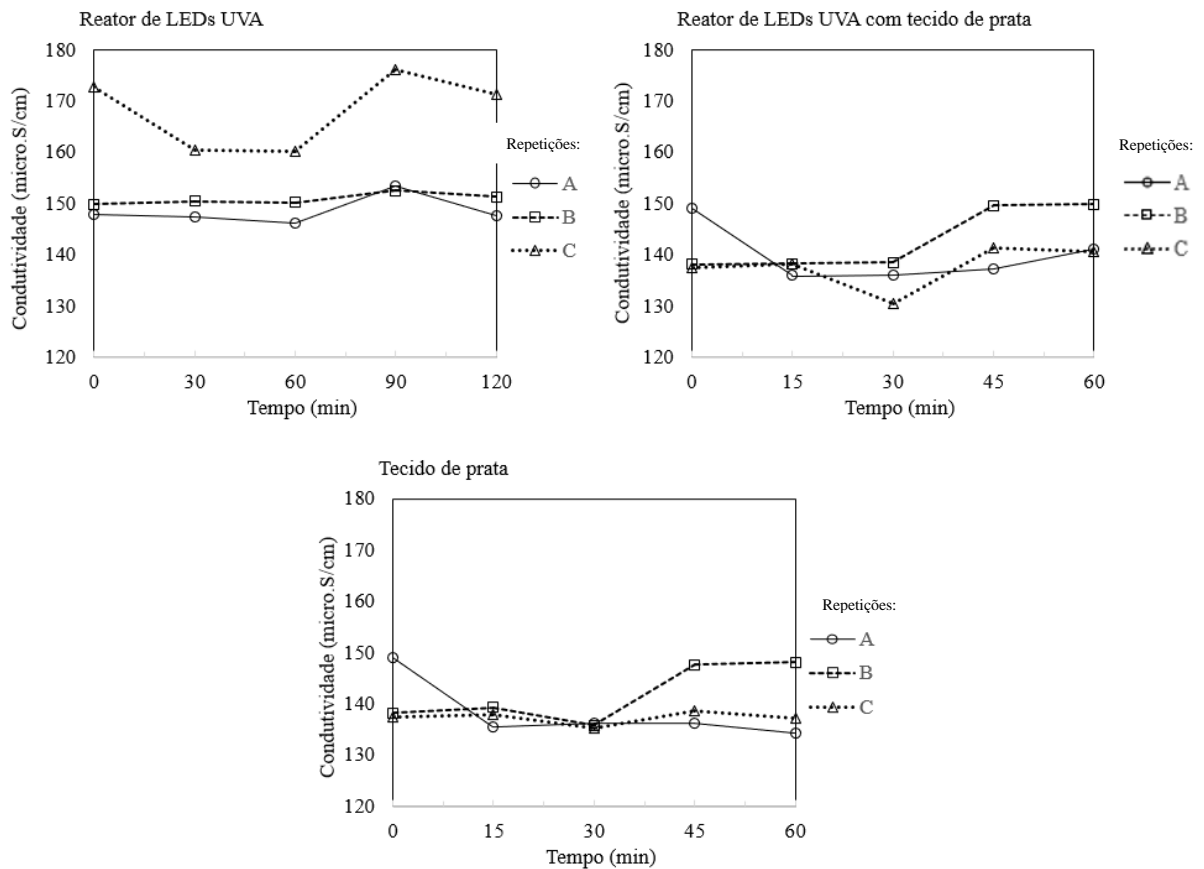
A condutividade das amostras de água desinfetada pelo tecido de prata ficou compreendida em  $138,90 \pm 4,49 \mu\text{S}/\text{cm}$ , não apresentando diferença significativa entre os diferentes tempos de contato (p valor =0,6679).

A condutividade elétrica das amostras de água desinfetada pelo reator de LEDs UVA combinado com o tecido de prata ficou compreendida em  $139,76 \pm 5,06 \mu\text{S}/\text{cm}$ , não apresentando diferença significativa entre os tempos de contato (p valor =0,2655).

Quando comparada a condutividade entre os três tipos de desinfecção, não apresentou diferença estatística entre a maior parte dos tempos de contato (p valor Tabela 5.10). Conclui-se que para as condições testadas, o tecido de prata e o reator UVA não produziram diferença significativa na condutividade das amostras. A condutividade poderia ter sido alterada, nos testes com o tecido de prata, devido a possível liberação de íons de prata na água de estudo. Além disto, a medição deste parâmetro foi realizada, pois a Legislação brasileira exige a medição da condutividade elétrica para mananciais subterrâneos (simulados neste estudo), no entanto, não estabelece valores de referência (BRASIL, 2021).

A Figura 5.8, apresenta o gráfico dos valores de condutividade dos três tipos de testes realizados. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados.

**Figura 5.8-** Valores da condutividade nos três tipos de testes realizados.



Fonte: Autora

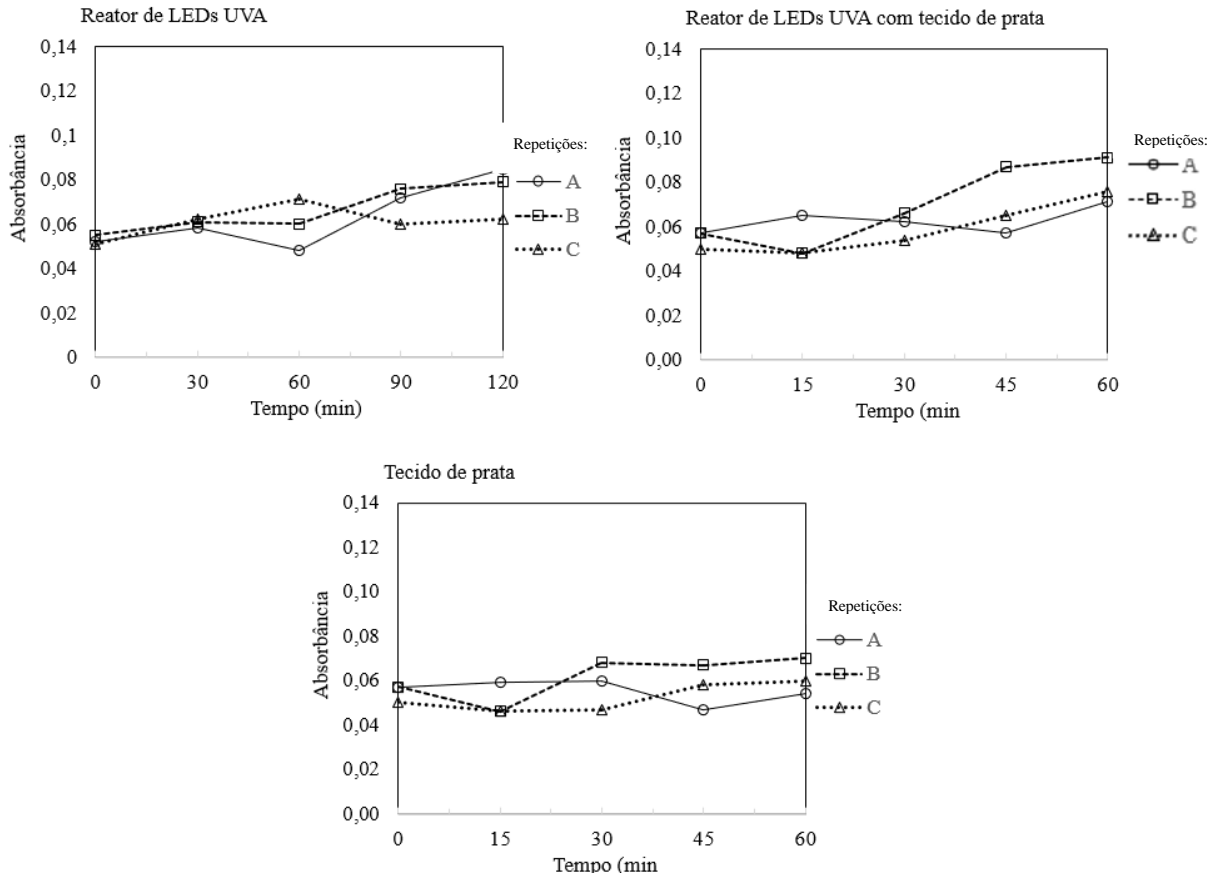
A Absorbância foi medida no comprimento de onda de 254 nm conforme recomendado por (WHO, 2018). Os valores de absorbância da água desinfetada pelo reator de LEDs UVA e pelo reator combinado com o tecido de prata ficaram compreendidos em  $0,06 \pm 0,01$ , não apresentando diferença significativa entre os tempos de contato ( $p$  valor = 0,2022 e 0,0708, respectivamente).

Os valores de absorbância da água desinfetada pelo tecido de prata ficam compreendidos em  $0,05 \pm 0,01$ , não apresentando diferença significativa entre os tempos de contato ( $p$  valor = 0,7087).

Quando comparada a absorbância entre os três tipos de desinfecção não foi apresentada diferença estatística ( $p$  valor, Tabela 5.10). Os valores de absorbância estão relacionados com a capacidade de absorção da radiação ultravioleta. Quanto maior a absorbância, menor a efetividade de métodos de desinfecção UV. Os valores de absorbância são afetados pela concentração de matéria dissolvida ou em suspensão, os quais configuram uma barreira para a passagem da luz (SANTOS, 2022). A Figura 5.9, apresenta o gráfico dos valores de

absorbância dos três tipos de testes realizados. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados.

**Figura 5.9-** Valores da absorbância nos três tipos de testes realizados.



Fonte: Autora

A absorbância de uma solução está relacionada com a transmitância de forma logarítmica. Quando a absorbância de uma solução aumenta, a transmitância diminui.

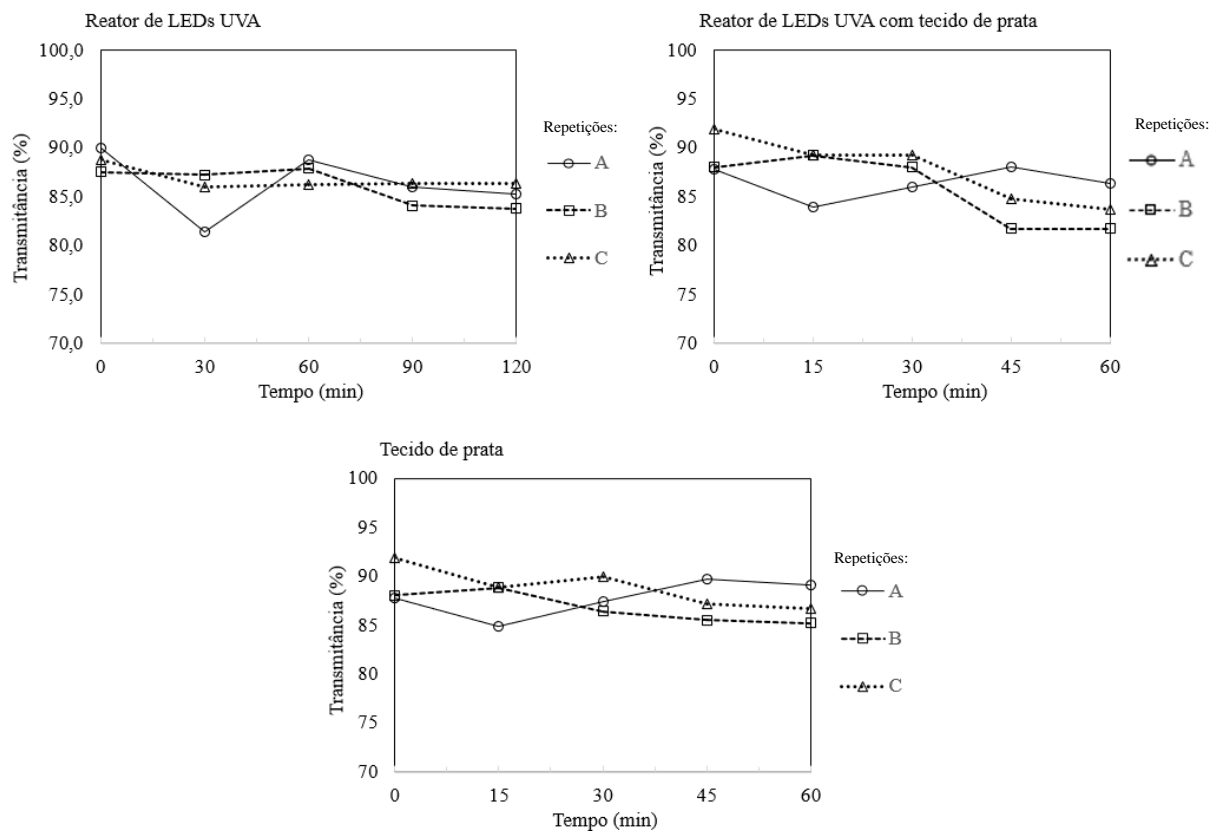
A transmitância foi medida no comprimento de onda de 254 nm. Os valores de transmitância da água desinfetada pelo reator de LEDs UVA ficaram compreendidos em  $86,68 \pm 1,05$ , não apresentando diferença significativa entre os tempos de contato ( $p$  valor = 0,1662).

Os valores de transmitância da água desinfetada pelo tecido de prata ficaram compreendidos em  $88,72 \pm 1,94$ , não apresentando diferença significativa entre os tempos de contato ( $p$  valor = 0,60521).

A transmitância das amostras de água desinfetada pelo reator de LEDs UVA combinado com o tecido ficou compreendido em  $87,78 \pm 3,05$ , não apresentando diferença significativa entre os tempos de contato ( $p$  valor = 0,3507).

Quando comparada transmitância entre os três tipos de desinfecção não foi apresentada diferença estatística (p valor, Tabela 5.10). Conclui-se que para as condições testadas, o tecido de prata e o reator UVA não produziram diferença significativa na absorbância e na transmitância das amostras. A Figura 5.10, apresenta o gráfico dos valores de transmitância dos três tipos de testes realizados. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados. Não foram encontrados registros de alteração da absorbância e da transmitância na desinfecção com LEDs UV.

**Figura 5.10-** Valores da transmitância nos três tipos de testes realizados



Fonte: Autora

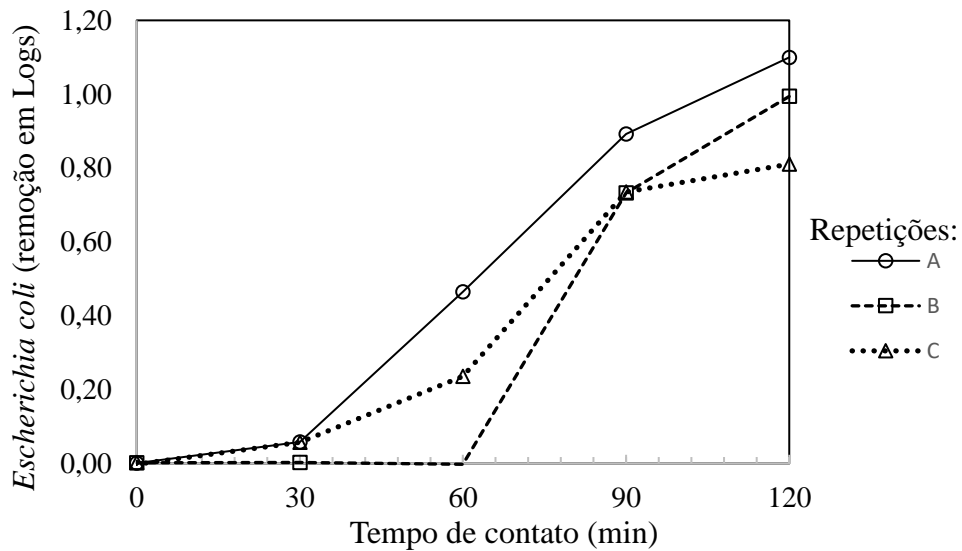
## 5.8 Parâmetro Microbiológico (*E. coli*)

Os resultados relativos à desinfecção da água de estudo inoculada com *E. coli* em  $10^6$  UFC/100 ml, nos três tipos de desinfecção realizados neste estudo são apresentados, em log, neste tópico, junto aos resultados dos testes em branco, os quais buscaram avaliar a ocorrência de morte natural das bactérias durante os mesmos tempos de contato aplicados na desinfecção.

### 5.8.1 Desinfecção pelo Reator de LEDs UVA

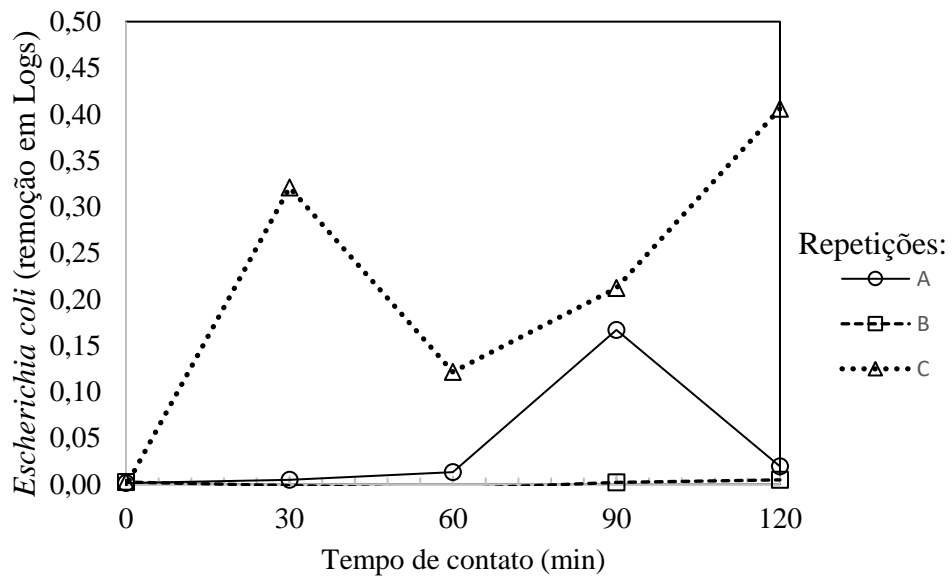
A inativação de *E. coli* na água desinfetada pelo reator de LEDs UVA e nos testes em branco estão dispostas na Figura 5.11 e na Figura 5.12, respectivamente. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados.

**Figura 5.11-** Remoção de *E. coli* na água desinfetada pelo Reator de LEDs UVA ao longo dos tempos de contato.



Fonte: Autora

**Figura 5.12-** Remoção de *E. coli* nos testes em branco de controle ao longo dos tempos de contato.



Fonte: Autora

A inativação de *E. coli* pela desinfecção com o reator de LEDs UVA começou muito baixa, com valores de remoção menores que 0,46 log nos tempos de contato de 30 e 60 min. As maiores inativações ocorreram para os tempos de contato de 90 e 120 min, com remoção máxima de 1,1 log, ainda considerado valor baixo de remoção. As 3 rodadas de testes realizados não apresentaram diferença estatística significativa entre si (p valor = 0,9402).

Nos estudos Hamamoto *et al.* (2007), com LEDs UVA (365nm) de alta potência, o tempo de contato necessário para reduzir *Escherichia coli* em 5 logs foi de 75 min, no entanto foi usada uma dose de radiação 3,7 vezes superior.

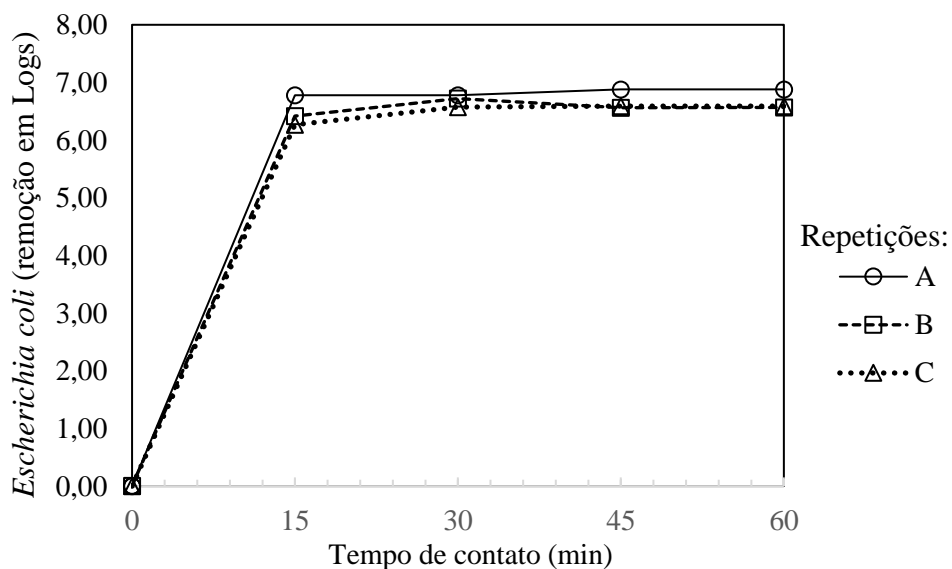
A desinfecção de até 1,1 log, pode ter sido atribuída ao processo de pasteurização ocorrido pelo aumento da temperatura da água em até 44,1° com o tempo de contato de 120 min. Segundo experimentos de Fogolari *et al.* (2012), para a temperatura de 45°C foram necessários mais de 142 min para redução de uma unidade logarítmica.

Os resultados dos testes em branco não apresentaram diferença estatística significativa em relação aos diferentes tempos de contato considerados (p valor = 0,6698). Pôde-se concluir que não houve morte natural de *E. coli* de forma significativa nas condições apresentadas.

### 5.8.2 Desinfecção pelo tecido de Prata

A inativação de *E. coli* na água desinfetada pelo tecido de prata e nos testes em branco estão dispostas na Figura 5.13 e na Figura 5.14, respectivamente. As letras A, B e C, correspondem as repetições dos testes realizados.

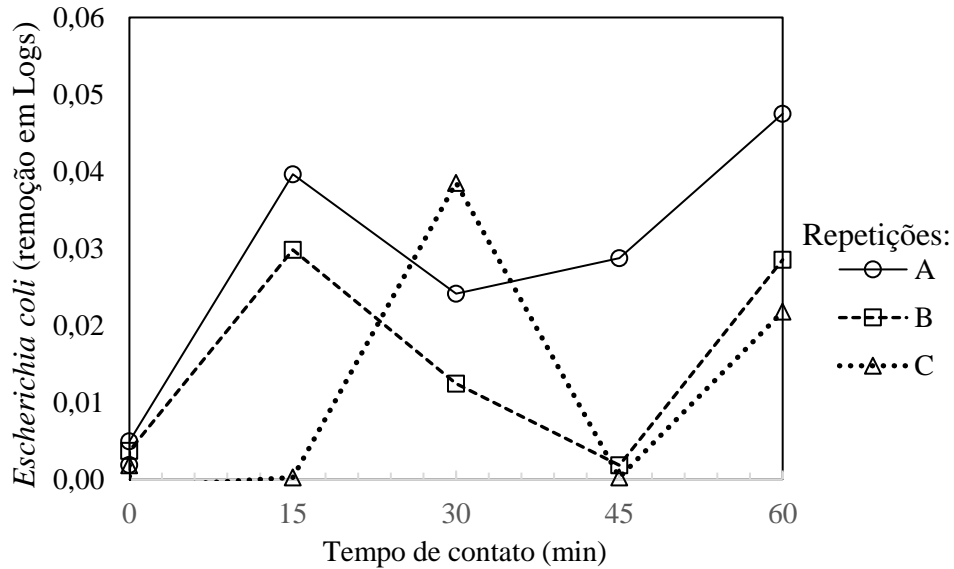
**Figura 5.13-** Remoção de *E. coli* na água desinfetada pelo tecido de prata ao longo dos tempos de contato.





Fonte: Autora

**Figura 5.14** -Remoção de *E. coli* nos testes em branco de controle ao longo dos tempos de contato.



Fonte: Autora

A remoção de *E. coli* pela desinfecção com o tecido de prata se mostrou totalmente eficaz, para o menor tempo de contato definido (15 min), atingindo valores de remoção de até 6,88 log. As 3 rodadas de testes realizados não apresentaram diferença estatística entre si (p valor = 1).

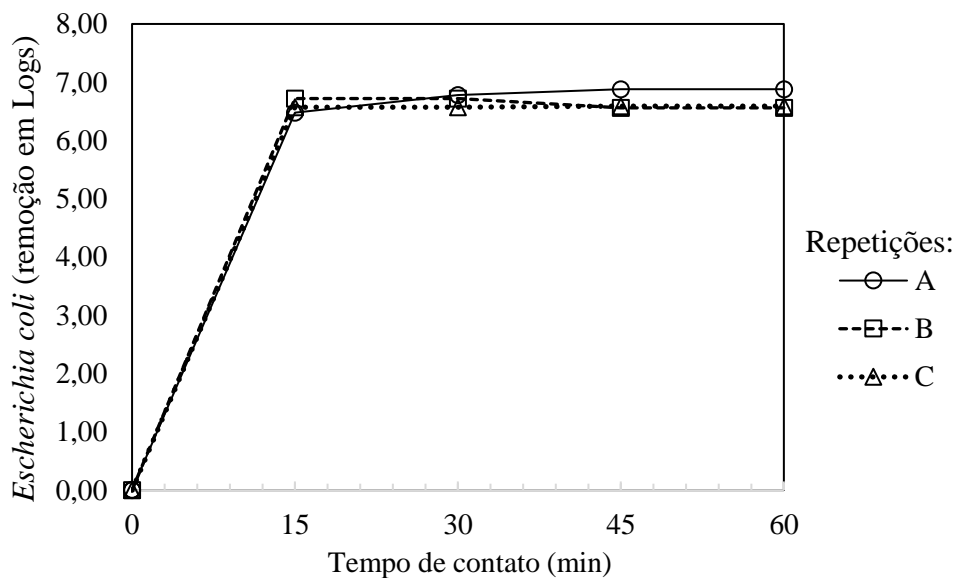
No estudo realizado por Sobrinho (2020), o tecido de prata também promoveu a eliminação total de *E. coli*, ao se utilizar 100 cm<sup>2</sup> do mesmo tecido em um tempo de contato de 5 min e um volume de 200mL de água. Nos estudos de Chen *et al.* (2013) foi possível obter desinfecção em um tempo de contato ainda menor, neste estudo um tecido de politereftalato de etileno (PET) foi revestido com prata pela técnica de pulverização catódica de magnetron de alta potência e foi atingida uma redução de 6.2 Log de *E. coli*, em um tempo de contato de apenas um minuto.

Os resultados dos testes em branco, os quais visaram avaliar a morte natural das bactérias não apresentaram diferença estatística significativa em relação aos diferentes tempos de contato considerados (p valor = 0,979). Logo, assim como nos testes em branco para a desinfecção no reator de LEDs UVA, ao analisar a Figura 5.14, pôde-se concluir que não houve morte natural de *E. coli* nas condições apresentadas.

### 5.8.3 Desinfecção pelo Reator de LEDs UVA combinados com o tecido de Prata

A variação de *E. coli* na água desinfetada pela Reator de LEDs UVA combinado com o tecido de prata está disposta na Figura 5.15.

**Figura 5.15-** Remoção de *E. coli* pelo Reator de LEDs UVA combinado com o tecido de prata.



Fonte: Autora

A remoção de *E. coli* pela desinfecção com o tecido de prata, combinado com reator de LEDs UVA, se mostrou eficaz para o menor tempo de contato definido (15 min), atingindo valores de remoção de até 6,88 log. As 3 rodadas de testes realizados não apresentaram diferença estatística entre si (p valor =0,6955).

O uso combinado do reator com o tecido de prata não demonstrou diferença estatística significativa com a desinfecção apenas com o tecido de prata (p valor > 0,3458, Tabela 5.10), pôde-se constatar que não houve sinergia significativa no uso dos dois métodos de desinfecção combinados para os tempos de contato utilizados e para as doses aplicadas neste estudo.

Não foram realizados testes em branco nesta etapa das análises, visto que os testes em branco realizados anteriormente forneceram resultados suficientes para demonstrar que não houve morte natural das bactérias.

## 6 Sistema UVC-LED em escala domiciliar

Visto que utilização dos LEDs UVA avaliados nesta pesquisa não se mostrou efetivo para os tempos de contato testados, recomenda-se, após confirmação em ensaios laboratoriais futuros, a utilização de um sistema de LEDs UVC, para a desinfecção de água em escala domiciliar. Nos tópicos 6.1 a 6.3, abaixo seguem, o sistema sugerido a ser desenvolvido e testado, o custo de investimento e a análise *Payback* do sistema.

### 6.1 Reator de LEDs UVC domiciliar

O sistema de desinfecção com Reator de LEDs UVC sugerido, atende uma família de 4 pessoas, considerando o valor mínimo para o consumo ideal de 100 L/d, por pessoa, recomendado por WHO (2014).

O tempo de contato estimado é de 5 segundos com a bomba operando com a vazão de 2 L/min. O tempo de contato pode ser alterado de forma inversamente proporcional à vazão da bomba de acordo com a equação 6.1 descrita a seguir.

$$Tc = \frac{V}{Q} \quad (6.1)$$

Onde:

Tc: Tempo de contato (s)

V: Volume útil do reator (m<sup>3</sup>)

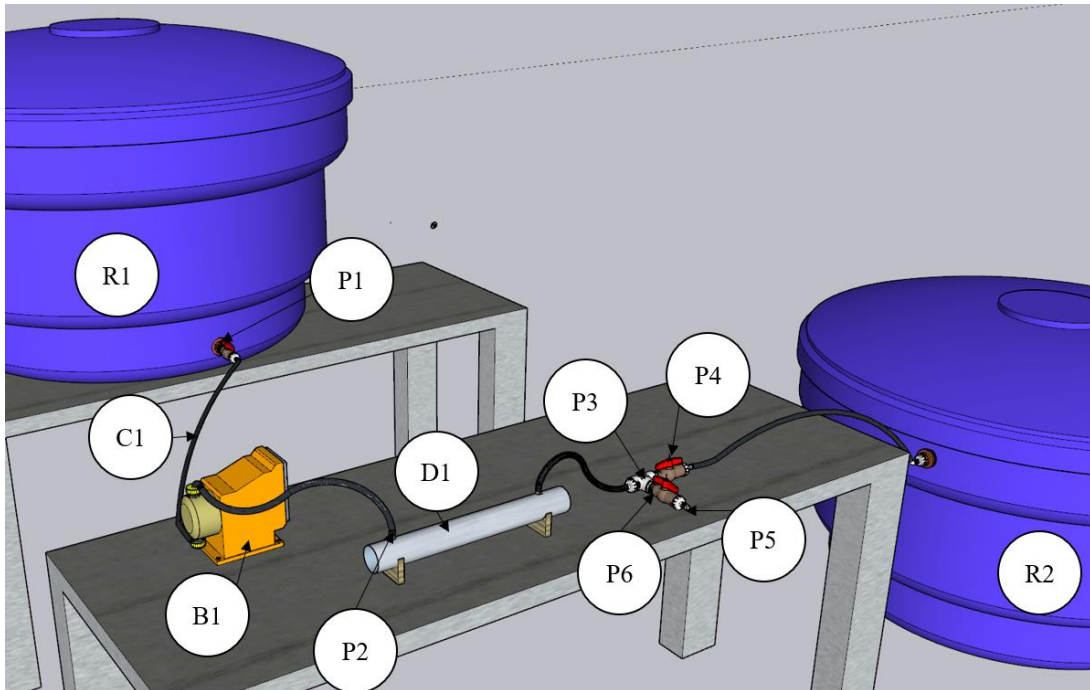
Q: Vazão do sistema (m<sup>3</sup>/s)

Para este cenário, o tempo que o sistema deve permanecer ligado para desinfetar o volume diário necessário é de 200 min.

A estrutura do sistema de desinfecção do reator de LEDs UVC sugerido (Figura 6.1) pode ser dividida em reservatório de água afluyente (R1), o qual armazena a água a ser desinfetada, bombeamento (B1), Reator de LEDs UVC (D1), onde ocorre a desinfecção e reservatório de água desinfetada (R2).

Os materiais e os esquemas desenvolvidos foram definidos de forma simplificada, a fim de facilitar a transferência da tecnologia.

**Figura 6.1-** Componentes da estrutura do sistema de desinfecção com reator UV LED.



R1 e R2: Reservatórios de 1000L; P1: Adaptador de caixa d'água PVC roscável; P2: Abraçadeira rosca sem fim  
 C1: Mangueira flexível de borracha; B1: Bomba Diafragma; D1: Reator de LEDs UVC; P3: Tê roscável PVC fêmea; P4: Registro esfera roscável fêmea; P5: Conexão Reta Rosca Externa e Engate Rápido; P6: Niple.

Fonte: Autora

Com a finalidade de simplificar a construção do reator, recomenda-se a utilização da estrutura de um reator comercial UV de lâmpada tradicional. A lâmpada UV do reator comercial poderá ser substituída por uma lâmpada de LEDs UVC a ser desenvolvida. Mais informações sobre os materiais recomendados se encontram na **Tabela 6.1**.

## 6.2 Estimativa de Custos de investimento

A Tabela 6.1 apresenta os materiais sugeridos para a construção do sistema de desinfecção com reator de LEDs UVC. As etiquetas utilizadas descrevem os elementos exibidos na Figura 6.1. A cotação dos itens da tabela se encontra nos anexos.

**Tabela 6.1-** Materiais necessários estimados para construção do sistema de desinfecção com reator de LEDs UVC.

Etiqueta	Item	Quantidade	Cotação	Data da cotação	Custo unitário Corrigido*	Custo Total**
<b>R1/R2</b>	Reservatório de água não desinfetada (1000L) e Reservatório de água desinfetada (1000L)	2 unidades	Anexo D	14/10/2022	R\$439,00	R\$878,00
<b>B1</b>	Bomba Diafragma de até 8 L/min	1 unidade	Anexo E	14/10/2022	R\$148,50	R\$151,18
<b>C1</b>	Mangueira flexível de borracha 1/4" (externo)	5 metros	Anexo F	14/10/2022	R\$ 48,50	R\$ 67,49
<b>P1</b>	Adaptador de caixa d'água 1/2" PVC roscável	2 unidades	Anexo G	14/10/2022	R\$21,10	R\$65,87
<b>P2</b>	Abraçadeira rosca sem fim 9mm - 1/4"	10 unidades	Anexo H	14/10/2022	R\$ 2,89	R\$ 54,00
<b>P3</b>	Tê roscável PVC fêmea 1/2"	1 unidade	Anexo I	14/10/2022	R\$ 3,63	R\$ 14,73
<b>P4</b>	Registro esfera roscável fêmea 1/2"	3 unidades	Anexo J	14/10/2022	R\$7,85	R\$51,54
<b>P5</b>	Conexão Reta Rosca Externa 1/2" e Engate Rápido 1/4"	4 unidades	Anexo K	14/10/2022	R\$20,80	R\$ 133,78
<b>P6</b>	Niple 1/2"	3 unidades	Anexo L	14/10/2022	R\$1,56	R\$19,68

<b>Etiqueta</b>	<b>Item</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Cotação</b>	<b>Data da cotação</b>	<b>Custo unitário Corrigido*</b>	<b>Custo Total**</b>
<b>REATOR</b> <b>D1</b>	Sistema Ultravioleta UVA1C Polaris (3.8 L/min)	1 unidade	Anexo C	14/10/2022	R\$1.402,96	R\$1.411,86
	LEDs de alta potência - Monocromático- 275nm a 280nm LEDs UVC 40mW – (Luminus Devices)	48 unidades	Anexo B	14/10/2022	R\$234,43	R\$ 11.551,34
	Fonte chaveada DC 12V 16,5A	1 unidade	Anexo M	14/10/2022	R\$162,90	R\$162,90
	Resistor 17 Ohms	48 unidades	Anexo N	14/10/2022	R\$0,38	R\$39,24
	Mão de obra e demais acessórios para o desenvolvimento do Reator (Estimado).	-	-	-	R\$ 8.459,15	R\$ 8.459,15

\* O custo unitário das cotações foram corrigidos para 14 de outubro de 2022, segundo a calculadora do cidadão, que considera o Índice Geral de Preços – Mercado( IGP-M) Fundação Getúlio Vargas (FGV), <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>> e não inclui o valor do frete.

\*\*O custo total inclui o valor do frete para a cidade de São Carlos-SP.

\*\*\*Valor dos LEDs foi convertido do dólar, em 14 de outubro de 2022, igual a R\$5,33. Foi adicionada a taxa de importação máxima de 60% sobre o valor do produto.

Fonte: Autora

Com os dados exibidos na Tabela 6.1, foi possível estimar o custo construtivo do sistema, através de cotações provenientes do *e-commerce* brasileiro. A análise econômica foi realizada no tópico 6.3, a seguir.

### 6.3 *Payback Simples*

O método utilizado para avaliar a viabilidade do sistema sob a ótica econômica, foi o *Payback*, que visa encontrar o tempo para que os ganhos financeiros se igualem ao que foi investido no início do projeto.

Para o cálculo do *Payback*, o investimento inicial considerou o custo de aquisição dos itens necessários para a construção do sistema e o valor estimado da mão de obra.

Para a mão-de-obra, é necessária a contratação de profissionais, para o desenvolvimento da lâmpada de LEDs UVC. Estima-se, a partir de orçamentos anteriores, que o custo será de R\$ 8.459,15 (Valor corrigido, segundo o Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M), para 14/10/2022). Destaca-se o valor elevado, devido ao desenvolvimento da tecnologia. O custo de produção poderá ser reduzido em replicações futuras. O investimento total estimado é exibido na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2-** Investimento total estimado para construção do sistema de desinfecção com reator de LEDs UVC.

<b>Estratificação do Investimento</b>		
Descrição	Valor (R\$)	%
Custo de aquisição dos materiais	R\$ 14.601,61	63%
Custo da mão-de-obra	R\$8.459,15	37%
Total investido	R\$ 23.060,76	100%

Fonte: Autora

Para os custos variáveis, estimou-se que o sistema demandará manutenções e gastos de energia que totalizam valores anuais na ordem de 10% do custo de aquisição dos materiais, resultando em R\$ 121,68 ao mês e R\$ 1460,16 ao ano. A vida útil dos LEDs UVC cotados é dependente da corrente do circuito e da temperatura de junção. No desenvolvimento do sistema, o fabricante deverá ser contactado para mais detalhes.

A fim de avaliarmos o *Payback*, é necessário que haja um retorno financeiro para o investimento realizado. Como o sistema é pensado para casos em que não haja o devido fornecimento de água tratada, a comparação será feita com o cenário em que se compra água de consumo proveniente de caminhão pipa.

As pesquisas realizadas indicaram grande variância no preço da água distribuída por caminhão pipa, podendo encontrá-las por valores entre R\$ 100,00 e R\$ 1.000,00 para o fornecimento de 10.000 litros de água. Para o cálculo do *Payback*, considerou-se o valor de R\$ 200,00.

O consumo diário de água adotado foi de 400 litros por dia, para uma família de 4 pessoas, considerando as recomendações mínimas de WHO (2014), para um consumo ideal, totalizando 12.000 litros de água no mês, o que gera um gasto mensal de R\$ 240,00, para a opção do abastecimento com caminhão pipa. Este valor é elevado, visto que é esperado que o gasto com saneamento não supere 5% da renda familiar (ONDAS, 2021). Ao considerar o valor do salário mínimo no Brasil, em 2022 de R\$ 1.212,00, o gasto não deveria ultrapassar R\$60,60.

A Tabela 6.3 exibe a comparação das despesas do reator com os gastos pelo fornecimento de água por caminhão pipa. Utilizando o *Payback* Simples, tem-se o seguinte:

**Tabela 6.3-** Tempo de retorno estimado pelo método do *Payback* Simples

Avaliação do investimento - <i>Payback</i> Simples				
Ano	Despesas do Sistema c/ Reator UVC	Despesas com caminhão pipa	<i>Payback</i> Simples	% retorno
1	R\$ 23.060,76	R\$ 2.880,00	-R\$ 20.180,76	12%
2	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 18.760,92	23%
3	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 17.341,08	33%
4	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 15.921,24	42%
5	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 14.501,40	50%
6	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 13.081,57	57%
7	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 11.661,73	63%
8	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 10.241,89	69%
9	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 8.822,05	75%
10	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 7.402,21	80%
11	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 5.982,37	84%
12	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 4.562,53	88%
13	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 3.142,69	92%
14	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 1.722,85	96%
15	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	-R\$ 303,01	99%
16	R\$ 1.460,16	R\$ 2.880,00	R\$ 1.116,83	102%

Fonte: Autora



Ou seja, é esperado que, ao término de 16 anos, o sistema de desinfecção com reator de LEDs UVC, pague o investimento inicial e comece a gerar economia, se comparo com os gastos com o abastecimento por caminhão pipa.

Cabe salientar que tal retorno é obtido ao considerar um valor relativamente baixo, para o preço de abastecimento via caminhão pipa, podendo o retorno ser mais rápido em casos de valores mais elevados para a aquisição da água tratada. Além disto, o custo de fabricação da lâmpada de LEDs UVC, tende a reduzir após o desenvolvimento e o aperfeiçoamento da tecnologia.

Dessa forma, os resultados mostram que, se comparado à opção do fornecimento de água para consumo proveniente de caminhão pipa, o sistema UVC proposto, aparenta boa alternativa, sob o ponto de vista financeiro, sendo recomendado novos estudos, visando a redução dos custos e um maior entendimento sobre esta alternativa de desinfecção.

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o reator atingiu o valor máximo de 1,1 log de redução de *E. coli*, para o maior tempo de contato testado de 120 min. Em comparação aos estudos anteriores, a dose necessária estimada para desinfecção seria em torno de 3,6 vezes a dose máxima aplicada de 239,74 Wh/m<sup>2</sup>. O baixo valor atingido de redução também pode ser atribuído ao aumento de temperatura no reator, nos maiores tempos de contato testados, para cerca de 40° C.

O uso combinado do reator com o tecido de prata não indicou sinergia na desinfecção nas condições utilizadas neste trabalho. Além disso, o uso dos dois métodos alterou a qualidade da água, com a elevação dos valores da turbidez, ocasionado pela degradação do tecido, possivelmente gerada pelo aumento da temperatura e pela radiação UVA aplicada ao tecido de prata.

Os resultados indicam que o tecido de prata sozinho é eficiente para a desinfecção da água de estudo com *E. coli* a 10<sup>6</sup> UFC/100mL. Não houve interferência significativa nos parâmetros de qualidade testados na desinfecção com tecido de prata como processo único. No entanto, faz-se necessário a realização de testes para verificar se o residual de prata se encontra dentro dos limites recomendados para água de consumo. Faz-se também necessário descobrir os componentes dos tecidos de prata para descartar possíveis interferências negativas na qualidade da água.

Pode-se concluir que o método de desinfecção com LEDs para faixa de comprimento de onda UVA, de forma isolada, não se mostra viável, devido aos altos tempos de contato necessários para a desinfecção. Todavia estudos demonstram que a utilização de LEDs UVA, anteriormente ao uso dos LEDs UVC pode diminuir a capacidade de fotorreativação de determinados microrganismos.

Por fim, foi sugerida a construção de um sistema de desinfecção com LEDs UVC, com a utilização de LEDs que emitem radiação ultravioleta no comprimento de onda de 275 a 285nm. Estima-se que o sistema sugerido seja capaz de eliminar *E. coli* com o tempo de contato de 5 segundos, porém, testes em escala de bancada e piloto são necessários

A análise econômica do tipo *Payback* simples do sistema UVC proposto concluiu que o retorno do investimento seria atingido em 16 anos, se considerado a comparação do fornecimento de água por caminhões pipa.

## 8 REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington, DC, 2012.

BAHCELIOGLU, E. *et al.* Silver-based nanomaterials: A critical review on factors affecting water disinfection performance and silver release, **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 51:20, 2389-2423, 2021.

BECK, S. E. *et al.* Wavelength-dependent damage to adenoviral proteins across the germicidal UV spectrum. **Environmental Science & Technology**, v. 52, p 223-229, 2018.

BECK, S. E. *et al.* Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual wavelength synergy. **Water Research**, v. 109, p 207–216, 2017.

BECK, S. E. *et al.* Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems. **Water Research**, v. 70, p 27-37, 2015.

BESARATINIA, A. *et al.* Wavelength dependence of ultraviolet radiation-induced DNA damage as determined by laser irradiation suggests that cyclobutane pyrimidine dimers are the principal DNA lesions produced by terrestrial sunlight. **FASEB Journal**, v. 25, p. 3079-3091, 2011.

BIGONI, S. **O comportamento de luminárias LED utilizadas em instalações no setor comercial e sua relação com a temperatura ambiente e umidade relativa do ar**. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

BOLTON, J. R. Action Spectra: A Review. **IUVA News**, v. 19, p. 10-12, 2017.

BOLTON, J. R.; COTTON, C.A.C. **The Ultraviolet Disinfection Handbook**. 1. Ed. Denver, CO, USA: American Water Works Association, 2008.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Portaria GM/MS n° 888, de 4 de maio de 2021.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 2021.

CHEN, Y. *et al.* Antibacterial silver coating on poly(ethylene terephthalate) fabric by using high power impulse magnetron sputtering. **Surface & Coatings Technology**, v. 232, p. 868-875, 2013.

CHEN, R.Z. *et al.* Comparison of the action spectra and relative DNA absorbance spectra of microorganisms: information important for the determination of germicidal fluence (UV dose) in an ultraviolet disinfection of water, **Water Research**, v. 43, p. 5087–5096, 2009.

CHEN, X., SCHLUESENER, H. J. Nanosilver: a nanoparticle in medical application. In: **Toxicology Letters**, v. 176, n. 1, p. 1-12, 2008.

CHEVREMONT, A. C. *et al.* Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters. **Science of the Total Environment**, v. 426, p. 304–310, 2012a.

CHEVREMONT, A. C. *et al.* Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs. **Desalination**, v. 285, p. 219–225, 2012b.

CLANCY, J. L. *et al.* UV light inactivation of *Cryptosporidium* oocysts. **Journal AWWA**. V. 90, p. 92-102, 1998.

DIAS, V. D. **Radiação ultravioleta e ozônio aplicados como métodos alternativos de desinfecção de efluentes secundários de esgoto sanitário.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

DOWNES, A. & BLUNT, T. P. Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms. **Proceedings of the Royal Society**, v. 28, p. 488–500, 1877.

DURÁN, N. *et al.* Nanotoxicologia de nanopartículas de prata: toxicidade em animais e humanos. **Química Nova**, [S.L.], v. XY, n. 00, p.1-8, 2018.

FERREIRA, J. Z. **Estudo comparativo entre lâmpadas fluorescentes tubulares t8 e tubulares de led.** Monografia de especialização (pós-graduação). Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FOGOLARI, O. *et al.* Determinação de parâmetros cinéticos da inativação térmica de *Escherichia coli* em lodo de esgoto. **Eng Sanit Ambient.** v. 17, n. 3, p. 255-262, 2012.

FRIEDBERG, E. C. *et al.* **DNA Repair and Mutagenesis.** Washington, D.C, USA: ASM Press, 1995.

GOLATA, P. Seeing the Light between Mid- And High-Power LEDs. **MOUSER ELECTRONICS.** 2019. Disponível em: <<https://br.mouser.com/blog/blog/seeing-the-light-between-mid-and-high-power-leds>> Acesso em: 6 de agosto de 2022.

GOMES, T. A. T. Diarrheagenic *Escherichia coli*. **Brazilian journal of microbiology.** v. 47S, p. 3-30, 2016.

HAMAMOTO, A. *et al.* New water disinfection system using UVA light-emitting diodes. **Journal of Applied Microbiology,** v. 103, p. 2291-2298, 2007.

HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., AND P. D. RYAN. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica** 4(1): 9pp, 2001. Disponível em: <[http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm)>.

HENRI, V. *et al.* Sterilization de Grandes Quantites d'Eau par les Rayons Ultraviolets. **Comptes rendus de l'Académie des Sciences,** v. 150, p. 932-934, 1910.

HIJNEN, W. A. M. *et al.* Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. **Water Research,** v. 40, p. 3–22, 2006.

HULL, N. M. *et al.* UV LED water disinfection: Validation and small system demonstration study, **AWWA Water Science,** e. 1148, p. 1-11, 2019.

IBRAHIM, M. A. S. *et al.* Evaluating the impact of LED bulb development on the economic viability of ultraviolet technology for disinfection. **Environmental Technology**, v. 35, p. 400–406, 2013.

IRIARTE, G. Z. **Estrategia de potabilizacion de agua para consumo humano en la comunidad de yayani alto. (municipio morochata)**. Universidad mayor de san simón. Facultad de ciencias sociales, Cochabamba, 2021.

JARVIS, P. *et al.* Application of Ultraviolet Light-Emitting Diodes. (UV-LED) to Full-Scale Drinking-Water Disinfection. **Water**, MDPI Journal, 2019.

JEWETT, J. W.; SERWAY, R. A. **Physics for scientists & engineers**. 6. ed. Pomona, CA, 2004.

KIM, H. *et al.* Synergistic effect of UV-C LED irradiation and PLA/PBAT-based antimicrobial packaging film on fresh-cut vegetables. **Food Control**. v. 138, article. 109027, 2022.

KLEIN, R. S. **OBTENÇÃO DE SENSORES PLASMÔNICOS BASEADOS EM NANOPARTÍCULAS DE PRATA**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Licenciatura em Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2017.

LABRIOLA, V. F. **LEDs-UV como fontes luminosas para Processos Oxidativos Avançados: Inativação de Nitrofurantoína pelo Processo Foto-Fenton**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

LAZAROVA, V. *et al.* Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. **Water Science and Technology Journal**, v. 40, p. 203-213, 1999.

LI, X. *et al.* Evaluation survey of microbial disinfection Methods in UV-LED water treatment systems, **Science of the Total environment**, v. 659, p. 1415-1427, 2019.

LI, *et al.* Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photoreactivation and dark repair of Escherichia coli. **Water Research**, v. 126, p. 134–143, 2017.

Machado, F. M. **Avaliação do uso de nanopartículas de prata e atividade antimicrobiana para tratamento de águas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MARIITA, R. M. *et al.* Disinfection Performance of a Drinking Water Bottle System With a UV Subtype C LED Cap Against Waterborne Pathogens and Heterotrophic Contaminants. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, article 719578, 2021.

MORIO, K. A. *et al.* Using ultraviolet (UV) light emitting diodes (LED) to create sterile root canals and to treat endodontic infections. **Current Opinion in Biomedical Engineering**. v. 23, article. 100397, 2022.

MOUSER ELETRONICS. **MOUSER ELETRONICS**.2022 <<https://br.mouser.com/>>  
Acesso em: 6 de agosto de 2022.

NATARO, J. P.; KAPER. Diarrheagenic Escherichia coli. **Clinical Microbiology Reviews**. v. 11, n. 1, p. 142-201, 1998.

NEAMEN, D. A. **Semiconductor physics and devices: Basic principles**. 4<sup>th</sup> ed. Nova York. McGraw-Hill, 758 p. 2011.

OGUMA, K. *et al.* Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems. **Desalination**, v. 328, p. 24–30, 2013.

ONDAS. **ÁGUA COMO DIREITO: Tarifa Social como Estratégia para a Acessibilidade Econômica**. 1. ed. Letra Capital, Rio de Janeiro- RJ; Brasília - DF, 2021.

PASCHOALATO, C. F. P. R. *et al.* Formação de subprodutos orgânicos halogenados nas operações de pré-oxidação com cloro, ozônio e peroxônio e pós-cloração em água contendo substância húmica. **Eng. sanit. ambient.** v. 13, n. 3, p. 313-322, 2008.

PERSAUD, A. T. *et al.* A UV-LED module that is highly effective at inactivating human coronaviruses and HIV-1. **Virology Journal.** 2022

PROSAB. **Métodos Alternativos de Desinfecção da Água.** Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. 1. Ed. São Carlos, SP, 2001.

ROY, A. Green synthesis of silver nanoparticles: biomolecule-nanoparticle organizations targeting antimicrobial activity *et al.*, **The Royal Society of Chemistry.** v. 9, p. 2673-2702, 2019.

SABOGAL PAZ, L. P. **Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno porte.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTOS, G. R. *et al.* Avanços analíticos baseados em modelos de calibração de primeira ordem e espectroscopia UV-VIS para avaliação da qualidade da água: uma revisão - parte 1. **Quim. Nova.** v. 45, n. 3, p. 314-323, 2022.

SHEN, L. *et al.* Efficacy of UVC-LED in water disinfection on *Bacillus* species with consideration of antibiotic resistance issue. **Journal of Hazardous Materials**, v. 386, article 121968, 2020.

SHUR, M.S.; GASKA, R. Deep-ultraviolet light-emitting diodes. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 57, p. 12–25, 2010.

SILVA, B. H. L *et al.* Trihalometanos em água potável e riscos de câncer: simulação usando potencial de interação e transformações de bäcklund. **Quim. Nova.** v. 38, n. 3, p. 309–315, 2015.



SINHA, R.P. & HADER, D. P. UV-induced DNA damage and repair: a review.

**Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 1, p. 225-236, 2002

SOBRINHO, R. P. **Desempenho de tecidos de prata no pós-tratamento de água em filtros lentos em escala domiciliar e aplicação em uma residência unifamiliar popular: projeto de abastecimento e instalações hidráulicas e sanitárias.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

SOMMER, R. *et al.* **UV Disinfection of Drinking Water in Europe: Application and Regulation.** In Proc. Of the First Asia Regional Conference on Ultraviolet Technology for Water, Wastewater, and Environmental Applications. Scottsdale, Ariz.: International Ultraviolet Association, 2002.

SONG, L. *et al.* Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). **Science of the Total Environment**. v. 665, p. 1103–1110, 2019.

SONG, K. *et al.* Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. **Water Research**, v. 94, p. 341–349, 2016.

SORO, A. B. *et al.* Application of a LED-UV based light technology for decontamination of chicken breast fillets: Impact on microbiota and quality attributes. **LWT**. v. 145, article. 111297, 2021.

SUNDAR, K. P.; KANMANI, S. Design and evaluation of zero-energy UVC-LED reactor fitted with hand pump system for disinfection. **AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society**. V. 70.1, 2021.

USEPA. **Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule.** United States Environmental Protection Agency. Office of Water, 2006.

USEPA. **Ultraviolet Disinfection guidance Manual.** United States Environmental Protection Agency. Office of Water, 2003.

VILHUNEN, S. *et al.* Ultraviolet light-emitting diodes in water disinfection, **Environmental Science and Pollution Research**, v. 16, p. 439–442, 2009.

WHO. **WHO international scheme to evaluate household water treatment technologies harmonized testing protocol: technology non-specific Version 2.1**. World Health Organization, 2018.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality, 4<sup>th</sup> edition, incorporating the 1<sup>st</sup> addendum**. Geneva, Switzerland, 2017.

WRF. **WRF 4376: Guidance for implementing action spectra correction with medium pressure UV disinfection**. Water Research Foundation, Denver, CO, USA, 2015.

WURTELE, M.A. *et al.* Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes e UV LEDs e for water disinfection, **Water Research**, v. 45, p. 1481–1489, 2011.



## 9 ANEXOS

## Anexo A- Cotação dos LEDs UVA.

27/10/2020 Bling - DANFE

RECEBEMOS DE DUALCOM.COM DE MAQ EQUIP E SERV LTDA OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO		NF-e Nº 039090 Série 1
Data de recebimento	Identificação e assinatura do recebedor	

---

 <b>DUALCOM.COM DE MAQ EQUIP E SERV LTDA</b> RUA CURUPAITIS, 888, SANTA QUITERIA 80.310-180 - Curitiba - PR Fone (41) 3027-5851 www.dualshop.com.br - atendimento@dualcom.com.br	<b>DANFE</b> Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica 0-Entrada 1-Saída <b>Nº 039090</b> SERIE: 1 Página: 1 de 1	Controle do Fisco  Chave de acesso 4120 1008 7746 8500 0135 5500 1000 0390 9015 2798 6730 Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e <a href="http://www.nfe.fazenda.gov.br/portal">www.nfe.fazenda.gov.br/portal</a> ou no site da Sefaz autorizadora
---	--	--

Natureza da operação VENDA CONSUMIDOR FINAL		Protocolo de autorização de uso 14120020545548 27/10/2020 14:08:47	
Inscrição Estadual S04.01987-90	Inscr. est. do subst.trib.	CNPJ 08.774.685/0001-35	

<b>Destinatário/Remetente</b>			
Nome / Razão Social UNIVERSIDADE DE SAO PAULO	CNPJ/CPF 63.025.530/0026-24	Inscrição Estadual ISENTO	Data emissão 27/10/2020
Endereço Avenida Trabalhador Sancerlense, 400	Bairro Parque Arnold Schimidt	CEP 13.585-590	Data saída 27/10/2020
Município São Carlos	Fone/Fax (16) 3773-8267	UF SP	Hora saída 14:08:47

<b>Faturas</b>																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Número</th> <th>Vencimento</th> <th>Valor</th> <th>Número</th> <th>Vencimento</th> <th>Valor</th> <th>Número</th> <th>Vencimento</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>001</td> <td>08/11/2020</td> <td>350,00</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Número	Vencimento	Valor	Número	Vencimento	Valor	Número	Vencimento	Valor	001	08/11/2020	350,00						
Número	Vencimento	Valor	Número	Vencimento	Valor	Número	Vencimento	Valor										
001	08/11/2020	350,00																

<b>Cálculo do imposto</b>						
Base de cálculo do ICMS 0,00	Valor do ICMS 0,00	Base de cálculo do ICMS Subst. 0,00	Valor do ICMS Subst. 0,00	Valor do FCP ST 0,00	Valor total dos produtos 350,00	
Valor do frete 0,00	Valor do seguro 0,00	Desconto 0,00	Outras despesas acessórias 0,00	Valor do IPI 0,00	Valor total da nota 350,00	

<b>Transportador/Volumes transportados</b>						
Nome AGF PRES ARTHUR BERNARDES	Frete por conta 0 - Contratação do Frete por conta do Remetente (CFP)	Código ANTT	Placa do veículo	UF PR	CNPJ/CPF 85.504.231/0001-95	Inscrição Estadual 1019175177
Endereço AV PRES. ARTHUR BERNARDES, nº 286, SANTA QUITERIA	Município Curitiba	UF PR				
Quantidade 1	Especie	Marca	Numeração	Peso bruto 1.000,000	Peso líquido 0,000	

<b>Itens da nota fiscal</b>														
Código	Descrição de produto/serviço	NCM/SH	CSOSN	CFOP	UN	Qtde	Preço un	Preço total	B.C.	ICMS	Vir.ICMS	Vir.IPI	%ICMS	%IPI
K1322	LED 5mm ULTRA BRILHO ULTRA-VIOLETA UV 20-30 GRAUS CRISTAL PTH	85414022	1400	6.108	UN	1.000	0,35	350,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	


<b>Cálculo do ISSQN</b>			
Inscrição Municipal 14010538.120-9	Valor total dos serviços I	Base de cálculo do ISSQN 0,00	Valor do ISSQN 0,00

<b>Dados adicionais</b>	
Observações Aos cuidados de: JOSE PEPI - OD912272218BR Texto condições comerciais: Declaramos estar ciente das penalidades previstas na Lei 8666/93 e alterações posteriores e na Resolução USP Nº 760/2018, no caso de descumprimento desta proposta.	Reservado ao fisco

27/10/2020 14:07:04

## Anexo B- Cotação dos LEDs UVC.

1 - 1 of 1 Checkout

Sort	Product Detail	Description	Quantity	Availability	Unit Price (USD)	Ext. Price (USD)	
1	 <p>Mouser #: 896-XST3535UVCE27501 Mfr. #: XST-3535-UV-A60-CE275-01 Mfr.: Luminus Devices Customer #: <input type="text"/></p>	High Power LEDs - Single Color 275nm to 280nm UVC LED 40mW RoHS Compliant QuickView <a href="#">QuickView</a>	<input type="text" value="48"/>	48 Ships Now	\$27.49	\$1,319.52	

---

By submitting your order you agree to these [terms and conditions](#).  
For additional information on availability, click on the Mouser Part #.

**\*\*All MouseReel™ items are non-cancellable and non-returnable.**

Incoterms:FCA (Shipping Point)  
Duty, customs fees and taxes are collected at time of delivery.

<b>Merchandise:</b>	<b>\$1,319.52</b>
<b>Shipping:</b> UPS Worldwide Express Saver	<b>\$35.00</b>
<a href="#">+ More Shipping Options</a>	
<b>Subtotal:</b>	<b>\$1,354.52</b>

Checkout

Fonte: <<https://br.mouser.com/ProductDetail/896-XST3535UVCE27501>>

## Anexo C- Cotação Reator Polaris- 228LPH (3,8 L/min)

## Sistema Ultravioleta UVA1C Polaris - 228 LPH (3.8 L/min)

Código ahcc1f9fk4 | [Ver descrição completa](#) | Polaris



★★★★★ [Avaliar produto](#)



Vendido por **Fast Filtros**

Entregue por **magalu**

O Magalu garante a sua compra, do pedido à entrega. [Saiba mais](#)

**R\$ 1.402,96**

ou 10x de R\$ 140,30 sem juros

**Cartão de crédito** sem juros R\$ 1.402,96  
10xR\$ 140,30

COMPRAR AGORA

ADICIONAR À SACOLA

SAO CARLOS, SP - 13566-590 [alterar](#)

**Receba em até 2 dias úteis** Após o pagamento confirmado R\$ 8,90

Os prazos de entrega começam a contar a partir da confirmação de pagamento e podem variar para mais de uma unidade de um mesmo produto.

Fonte: <https://www.magazineluiza.com.br/sistema-ultravioleta-uva1c-polaris-228-lph-3-8-l-min/p/ahcc1f9fk4/rc/rcnm/>

## Anexo D- Cotação Caixa D'água 1000 Litros

Fonte: <<https://www.google.com/shopping/product/8761388296750603768?sxsr=ALiCzsb1YlIUt9qm4fS8iYPXcNSImAJBQ:1665787910152&q=caixa+d%27%C3%A1gua+1000+litro>>

[os&biw=1632&bih=707&dpr=1.5&prds=eto:2948333339934751696\\_0,pid:5280538565281261869,rsk:PC\\_187770687966586483&sa=X&ved=0ahUKEwjwJnH5-D6AhWCBbkGHSPuDfgQ8wII7Qg>](https://www.americanas.com.br/produto/4922979551?epar=bp_pl_00_go_cc_d_9100_n_comp_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=6257f7e587c00289c296f647&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaDDt5JuNJFtjGFAO4JwFDfHOgYggf3V450WFUGFDKtC1WEUhTSjiLhoCKT8QAvD_BwE&cor=Amarelo&condition=NEW)

Anexo E- Cotação bomba diafragma até 8 L/min

Fonte: [https://www.americanas.com.br/produto/4922979551?epar=bp\\_pl\\_00\\_go\\_cc\\_d\\_9100\\_n\\_comp\\_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=6257f7e587c00289c296f647&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaDDt5JuNJFtjGFAO4JwFDfHOgYggf3V450WFUGFDKtC1WEUhTSjiLhoCKT8QAvD\\_BwE&cor=Amarelo&condition=NEW](https://www.americanas.com.br/produto/4922979551?epar=bp_pl_00_go_cc_d_9100_n_comp_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=6257f7e587c00289c296f647&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaDDt5JuNJFtjGFAO4JwFDfHOgYggf3V450WFUGFDKtC1WEUhTSjiLhoCKT8QAvD_BwE&cor=Amarelo&condition=NEW)

Anexo F- Cotação Mangueira de borracha 1/4”

Fonte: [https://www.americanas.com.br/produto/10498985?epar=bp\\_pl\\_00\\_go\\_cc\\_d\\_9100\\_comp\\_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=629e6cb22376eb9c728729e5&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaOJ4m9gaOEp-sFMABMciKx1GaK2FMvzEUUR9nuTi-7ENAEV5RcQzShoCiqEQAvD\\_BwE](https://www.americanas.com.br/produto/10498985?epar=bp_pl_00_go_cc_d_9100_comp_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=629e6cb22376eb9c728729e5&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaOJ4m9gaOEp-sFMABMciKx1GaK2FMvzEUUR9nuTi-7ENAEV5RcQzShoCiqEQAvD_BwE)

Anexo G- Cotação Adaptador de caixa d’água 1/2” PVC roscável

Fonte: <https://www.wermar.com.br/produto/107/484-adaptador-roscavel-com-anel-para-caixa-dagua-1-2-com-flange-tigre>

Anexo H- Cotação Abraçadeira rosca sem fim 9mm - 1/4”

Fonte: < [Anexo I- Cotação Tê roscável PVC fêmea 1/2”](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1951949097-abracadeira-9-13mm-para-mangueiras-14-10-unidades-JM?matt_tool=14804773&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14302215543&matt_ad_group_id=134553705348&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539425529185&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=331558135&matt_product_id=MLB1951949097&matt_product_partition_id=1404320022641&matt_target_id=aud-1439668500373:pla-1404320022641&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaJJVDtcqEqi4-yJy7J3bhbHjHZrU7dwyEf9iaznzMPEieTeMJR4BcNhoCACoQAvD_BwE></a></p>
</div>
<div data-bbox=)

Fonte: < [https://www.sibmateriais.com/te-roscavel-krona-1-2?utm\\_source=google&utm\\_medium=Shopping&utm\\_campaign=te-roscavel-krona-1-2](https://www.sibmateriais.com/te-roscavel-krona-1-2?utm_source=google&utm_medium=Shopping&utm_campaign=te-roscavel-krona-1-2)

[2&inStock&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaFpdGBiBod4ZGpskz\\_nBSsmZ1mAfhvyfbvufnnqbkYaiogk8mjYH-hoCQ-wQAvD\\_BwE#derivacao=215](https://www.americanas.com.br/produto/2827056141?epar=bp_pl_00_go_cc_d_9100_n_comp_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=60132b3b0c070442666f2e7f&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaJZTkEC7BzIADNrIDRBv2Teu69i_VBOzXf73TTbngpLOa5JC4trfoBoCq2sQAvD_BwE)>

Anexo J- Cotação Registro esfera roscável fêmea 1/2”

Fonte: [https://www.americanas.com.br/produto/2827056141?epar=bp\\_pl\\_00\\_go\\_cc\\_d\\_9100\\_n\\_comp\\_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=60132b3b0c070442666f2e7f&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaJZTkEC7BzIADNrIDRBv2Teu69i\\_VBOzXf73TTbngpLOa5JC4trfoBoCq2sQAvD\\_BwE](https://www.americanas.com.br/produto/2827056141?epar=bp_pl_00_go_cc_d_9100_n_comp_tk1&opn=YSMESP&WT.srch=1&offerId=60132b3b0c070442666f2e7f&gclsrc=aw.ds&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaJZTkEC7BzIADNrIDRBv2Teu69i_VBOzXf73TTbngpLOa5JC4trfoBoCq2sQAvD_BwE)

Anexo K- Cotação Conexão Reta Rosca Externa 1/2” e Engate Rápido 1/4”

Fonte: < [https://www.mksshop.com.br/pecas-eletoportateis/pecas-filtro-e-purificadores/conexao-reta-rosca-externa-12-e-engate-rapido-14-planeta-agua-cn005?parceiro=4410&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaEOaS1GIJVD6pOgE0IkeZII-xWtx9feoFWHQKx0J\\_4B-nr16x1xFRoCdwgQAvD\\_BwE](https://www.mksshop.com.br/pecas-eletoportateis/pecas-filtro-e-purificadores/conexao-reta-rosca-externa-12-e-engate-rapido-14-planeta-agua-cn005?parceiro=4410&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaEOaS1GIJVD6pOgE0IkeZII-xWtx9feoFWHQKx0J_4B-nr16x1xFRoCdwgQAvD_BwE)>

Anexo L- Cotação Niple 1/2”

Fonte: < [https://www.obramax.com.br/niple-roscavel-1-2-krona-89565546.html?region\\_id=138911&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaNuaKYPOkOTeOOC3OJBIT-elMzD3rJLzBkYwVucxvFUXrZqxpccg4aRoCKUEQAvD\\_BwE](https://www.obramax.com.br/niple-roscavel-1-2-krona-89565546.html?region_id=138911&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaNuaKYPOkOTeOOC3OJBIT-elMzD3rJLzBkYwVucxvFUXrZqxpccg4aRoCKUEQAvD_BwE)>

Anexo M- Cotação Fonte chaveada DC 12V 16,5A

Fonte: < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2204412030-fonte-metalica-chaveada-12v-165a-ms-200w-12v-JM?matt\\_tool=63064967&matt\\_word=&matt\\_source=google&matt\\_campaign\\_id=14303413826&matt\\_ad\\_group\\_id=133431076203&matt\\_match\\_type=&matt\\_network=g&matt\\_device=c&matt\\_creative=584156655540&matt\\_keyword=&matt\\_ad\\_position=&matt\\_ad\\_type=pla&matt\\_merchant\\_id=509159888&matt\\_product\\_id=MLB2204412030&matt\\_product\\_particion\\_id=691191464150&matt\\_target\\_id=aud-315891067339:pla-691191464150&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaJt5b\\_DESe10Yf9LTZReF5NvLqB\\_TaoikcL3mChh9cQzS4p2BqH47nhoC-lgQAvD\\_BwE](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2204412030-fonte-metalica-chaveada-12v-165a-ms-200w-12v-JM?matt_tool=63064967&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413826&matt_ad_group_id=133431076203&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=584156655540&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=509159888&matt_product_id=MLB2204412030&matt_product_particion_id=691191464150&matt_target_id=aud-315891067339:pla-691191464150&gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaJt5b_DESe10Yf9LTZReF5NvLqB_TaoikcL3mChh9cQzS4p2BqH47nhoC-lgQAvD_BwE)>

Anexo N- Cotação Resistor 17 Ohms

Fonte: < [https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-18r-5-2w.html?gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaCiLZ\\_dVp2SY2ov2PTaDf5ZZ2uPcnq8rDRLx3qUeqS4cP6L4KWMphoCvEYQAvD\\_BwE](https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-18r-5-2w.html?gclid=CjwKCAjwkaSaBhA4EiwALBgQaCiLZ_dVp2SY2ov2PTaDf5ZZ2uPcnq8rDRLx3qUeqS4cP6L4KWMphoCvEYQAvD_BwE)>