UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Saneamento,

Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Túlio Cesar Floripes Gonaçalves

AVALIAÇÃO DA INATIVAÇÃO DE MICRORGANISMOS INDICADORES EM ÁGUA PARA CONSUMO POR LED-UVC COMO TECNOLOGIA DE INATIVAÇÃO EM PONTO DE CONSUMO DOMICILIAR

Belo Horizonte

2024

Túlio Cesar Floripes Gonçalves

AVALIAÇÃO DA INATIVAÇÃO DE MICRORGANISMOS INDICADORES EM ÁGUA PARA CONSUMO POR LED-UVC COMO TECNOLOGIA DE INATIVAÇÃO EM PONTO DE CONSUMO DOMICILIAR

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Qualidade e Tratamento de Água Para Consumo Humano

Orientador: Dr. César Rossas Mota Filho

Belo Horizonte
2024

Gonçalves, Túlio Cesar Floripes.
G635a Avaliação da inativação de microrganismos indicadores em água para consumo por LED-UVC como tecnologia de inativação em ponto de consumo domiciliar [recurso eletrônico] / Túlio Cesar Floripes Gonçalves. – 2024.
1 recurso online (125 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: César Rossas Mota Filho.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Saneamento – Teses. 3. Vírus – Doenças – Teses. 4. Microorganismos patogênicos – Teses. 5. Radiação ultravioleta – Teses. 6. Água – Purificação – Teses. I. Mota Filho, César Rossas. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Marcio A. A. Gomes CRB/6 2812
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia
Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

"Avaliação da Inativação de Microrganismos Indicadores em Água para Consumo por LED-UVC como Tecnologia de Inativação em Ponto de Consumo Domiciliar"

TÚLIO CESAR FLORIPES GONÇALVES

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. César Rossas Mota Filho

Profa Maria Clara Vieira Martins Starling

Maria Ines Zanoli Sato

Profa Juliana Delgado Tinoco

Prof. Rodrigo de Freitas Bueno

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Prof. Eduardo Coutinho de Paula
Coordenador

Prof. Cesar Rossas Mota Filho
Orientador

Belo Horizonte, 12 de dezembro de 2024.

Documento assinado eletronicamente por **Juliana Delgado Tinôco**, **Usuário Externo**, em 15/12/2024, às 21:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Maria Inês Zanoli Sato**, **Usuário Externo**, em 30/12/2024, às 12:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo de Freitas Bueno**, **Usuário Externo**, em 07/10/2025, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Maria Clara Vieira Martins Starling**, **Professora do Magistério Superior**, em 21/10/2025, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Cesar Rossas Mota Filho**, **Professor do Magistério Superior**, em 21/10/2025, às 17:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula**, **Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 30/10/2025, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3794648** e o código CRC **50B35DF6**.

Referência: Processo nº 23072.271588/2024-11 SEI nº 3794648

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha Tia Iraci e a minha avó Aliria por sempre apoiarem e incentivarem a minha jornada acadêmica, e me proporcionarem preceitos sociais e culturais que contribuíram de forma ímpar para que eu pudesse buscar meus sonhos sempre com motivação, independentemente das adversidades.

Agradeço ao meu orientador Prof. Cesar, que desde o mestrado me permitiu voar e buscar conhecimento, com quem aprendi e tenho aprendido muito, exercendo papel fundamental na minha jornada acadêmica e profissional.

Agradeço aos meus amigos Caleb e Isabela, pelo apoio e carinho e por tantos momentos maravilhosos desde o nosso inesperado encontro no apartamento 306, com quem tive a oportunidade de crescer e me reencontrar.

Agradeço meus amigos Thaise, Luiza, Fran, Nath, Danilo e Alex, por todo apoio e pelos momentos maravilhosos que passamos e temos passado juntos, principalmente durante a pandemia, que foram e são essenciais para que eu possa me manter firme na jornada e ressignificam o conceito de amizade.

RESUMO

A contaminação microbiológica da água, proveniente de mananciais superficiais ou subterrâneos, ainda representa um desafio relevante à saúde pública global. Dentre os agentes infecciosos, os vírus vêm recebendo destaque devido à sua elevada presença em excretas humanas e à sua capacidade de causar doenças respiratórias e gastrointestinais, afetando especialmente populações vulneráveis. A interconectividade global intensifica o risco de disseminação viral, inclusive de cepas emergentes. Embora a cloração seja amplamente empregada como método de desinfecção, sua aplicação pode gerar subprodutos nocivos, como trihalometanos — compostos potencialmente carcinogênicos — além de odor e gosto residuais, levando à rejeição da água tratada por parte da população.

Nesse contexto, a radiação UV desponta como alternativa eficaz para inativação de microrganismos, especialmente em comunidades não atendidas por sistemas convencionais de abastecimento. Dentre as tecnologias UV, os LEDs UVC vêm se destacando por apresentarem vantagens como baixo consumo energético, robustez, emissão em comprimento de onda específico e possibilidade de alimentação por energia solar.

Este trabalho avaliou o uso de LEDs UVC (265 e 275 nm) na desinfecção de água para consumo humano, com foco na construção e teste de um protótipo aplicável em comunidades isoladas da Amazônia. Em bancada, foram testadas amostras de água tratada e não tratada inoculadas com *E. coli* Famp, *E. coli* CN-13, bacteriófagos MS2 e φX-174. As doses necessárias para inativação de 99,99% variaram de 13,48 a 15,1 mJ/cm² para Famp, 16,15 a 17,9 mJ/cm² para CN-13, e de 35,42 a 55,28 mJ/cm² para os bacteriófagos. Em etapa posterior, avaliou-se a inativação de vírus patogênicos, obtendo-se doses de 27 a 36 mJ/cm² para SARS-CoV-2, 54 a 63 mJ/cm² para adenovírus (HAdV), 51 a 90 mJ/cm² para HSV-1 e 92 a 102 mJ/cm² para o Vaccinia virus (VACV), demonstrando desempenho comparável ao de lâmpadas de mercúrio.

O protótipo desenvolvido demonstrou 100% de inativação de *E. coli* para vazões de até 100 mL/min. No entanto, o aumento da vazão resultou em menor tempo de exposição e reduções abaixo de 4 log, restringindo sua aplicação a fluxos reduzidos. Os resultados evidenciam o potencial da tecnologia LED UVC como solução viável, sustentável e descentralizada para desinfecção de água em contextos de vulnerabilidade e difícil acesso.

Palavras-chave: LED-UVC; vírus; indicadores patogênicos; desinfecção de água

ABSTRACT

Microbiological contamination of water from surface and groundwater sources remains a significant global public health concern. Among microbial contaminants, viruses have gained increasing attention due to their high prevalence in human waste and potential to cause respiratory and gastrointestinal illnesses, particularly in vulnerable populations. Global interconnectedness further facilitates the rapid spread of viral pathogens, including emerging strains. While chlorination is the most commonly used disinfection method, it poses drawbacks such as the formation of potentially carcinogenic byproducts (e.g., trihalomethanes), as well as undesirable taste and odor, often leading to consumer rejection and increased risk from alternative water sources.

Ultraviolet (UV) radiation has emerged as an effective alternative for microbial inactivation, particularly in communities without access to centralized water treatment systems. Within UV technologies, UVC LEDs stand out for their advantages, including low energy consumption, robustness, emission at specific wavelengths, and compatibility with solar power systems.

This study evaluated the use of UVC LEDs (265 nm and 275 nm) for drinking water disinfection, focusing on the development and testing of a prototype for potential use in remote Amazonian communities. In bench-scale experiments, treated and untreated water samples were inoculated with *E. coli* Famp, *E. coli* CN-13, and bacteriophages MS2 and φX-174. The UV doses required for 4-log (99.99%) inactivation ranged from 13.48 to 15.1 mJ/cm² for Famp, 16.15 to 17.9 mJ/cm² for CN-13, and 35.42 to 55.28 mJ/cm² for the bacteriophages. In a subsequent phase, disinfection tests using pathogenic viruses indicated required doses of 27–36 mJ/cm² for SARS-CoV-2, 54–63 mJ/cm² for adenovirus (HAdV), 51–90 mJ/cm² for HSV-1, and 92–102 mJ/cm² for vaccinia virus (VACV), demonstrating efficacy comparable to mercury-based UV lamps.

The prototype device achieved 100% inactivation at flow rates up to 100 mL/min. However, higher flow rates reduced particle residence time and led to inactivation below 4-log, indicating the device's suitability for low-flow applications. The results highlight the potential of UVC LED technology as a viable, decentralized, and sustainable solution for water disinfection in underserved and remote areas.

Keywords: LED-UVC; virus; pathogenic indicators; Water Disinfection

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais Técnicas de Tratamento de Água 18
Figura 2 – Localização da região da luz ultravioleta dentro do espectro eletromagnético.....25
Figura 3 - Esquema de construção de lâmpadas clássicas de UV.....28
Figura 4 - a) Espectro eletromagnético, b) saída da luz UV de baixa pressão e c) saída da luz UV de média pressão.....30
Figura 5 – Representação dos danos induzidos pela radiação UV e processo de reparo.....32
Figura 6 – a) absorbância UV dos nucleotídeos e b) absorbância UV do DNA.....33
Figura 7 – Formação de dímeros de timina no DNA após exposição à UV.....34
Figura 8 – Ilustração dos mecanismos de interferência na desinfecção UV por partículas.....40
Figura 9 – Comparação da absorção de UV para diferentes microrganismos.....41
Figura 10 – Esquema básico de aparato de feixe colimado usado para obter a curva de dose-resposta.....49
Figura 11 – Curvas de dose respostas típicas para desinfecção UV: a) curva para *MS2* e Poliovírus, e b) curva para coliformes totais para efluentes com concentrações de sólidos suspenso totais variadas.....39
Figura 12 – Propriedades de um LED UVC.....61
Figura 13 - Esquema de aparato de desinfecção por tubo colimado (a) e LED (b).....63
Figura 14 – Placas de lise do bacteriófago MS2.....81
Figura 15 - a) aparato experimental do LED UVC, b) espectro de emissão do LED com pico de 266,6 nm e c) espectro de emissão do LED com pico de 276,3 nm.....83
Figura 16 – Aparato inicial montado em recipiente de filtração.....88
Figura 17 – Perfis de velocidade para vazão de 250 mL/min: a) tubular, b) chicana vertical e c) chicana horizontal.....89
Figura 18 – Detalhes da malha a) externa e b) interna.....90
Figura 19 – Esquema do aparato para desinfecção.....91
Figura 20 – Exemplo de identificação de microrganismos em ágar cromogênico.....92
Figura 21 – Modelo de desinfecção Log-Linear dos microrganismos *E. coli* CN-13 e *E. coli* Famp.....96
Figura 22 - Modelos de desinfecção para Adenovírus, Herpes vírus Humano, SARS-COV-2 e *Vaccinia* vírus.....91
Figura 23 – Velocidade de escoamento e Tempo de residência das partículas no interior do aparato: a) 100 mL/min, b) 200 mL/min e c) 450 mL/min.....113
Figura 24 – Inativação de E.coli e Coliformes Totais.....114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características operacionais das lâmpadas UV.....31
Tabela 2 – Valores típicos de absorbância e transmitância para várias águas.....38
Tabela 3 – Dosagens de radiação para eficiência de inativação de 90%.....50
Tabela 4 – Dosagem para inativação de 4 log de bactérias com e sem fotorreativação.....50
Tabela 5 – Dosagens para eficiência de inativação de 90% ou 100%.....51
Tabela 6 – Sensitividade de microrganismos à radiação UV monocromática (MC) e policromática (PC).....52
Tabela 7 – Eficiência da Inativação de LED UVA para bactérias, bacteriófagos e vírus.....63
Tabela 8 – Eficiência da Inativação de LED UVB para bactérias, bacteriófagos e vírus.....65
Tabela 9 – Eficiência da Inativação de LED UVC para bactérias, bacteriófagos e vírus.....66
Tabela 10 – Eficiência da Inativação de LED UV para bactérias, bacteriófagos e vírus utilizando comprimento de onda combinado UVB+UVA, UVC+UVA e UVC+UVB.....70
Tabela 11 – Sensitividade UV para LEDs e Lâmpada de baixa pressão (LP).....65
Tabela 12 – Consumo de energia para inativação de 4 logs (kWh/m³), para os microrganismos *E. coli* Famp, CN-13, *MS2* e *φx174*, água bruta (AB) e água filtrada (AF).....99
Tabela 13 – Resumo das principais características dos vírus estudados.....111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais características dos agentes desinfetantes.....20
Quadro 2 – Mecanismos de desinfecção utilizando cloro, ozônio, radiação UV e pasteurização 22
Quadro 3 – Principais constituintes físico-químicos e sua influência sobra a desinfecção.....39
Quadro 4 – Principais Vantagens e Desvantagens dos LEDs-UV.....56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 OBJETIVOS 16

2.1 OBJETIVO GERAL 16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

3 REVISÃO DA LITERATURA 17

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA E PRINCÍPIOS BÁSICOS DA RADIAÇÃO UV 23
3.2 INATIVAÇÃO POR RADIAÇÃO UV 27
3.2.1 Fontes artificiais de radiação UV 27
3.2.2 Mecanismo de inativação 31
3.2.3 Eficiência germicida da radiação UV 35
3.2.4 Cinética de desinfecção por UV e metodologia de desenvolvimento de curva-resposta 42
3.2.5 Vantagens e Desvantagens da radiação UV 51
3.3 TECNOLOGIA DIODO DE EMISSÃO DE LUZ ULTRAVIOLETA (LED–UVC) APLICADA À DESINFECÇÃO DE ÁGUA 54
3.3.1 Fundamentos de LEDs – UV 56
3.3.2 Aspectos de fabricação e construtivos 58
3.3.3 Propriedades do LED UVC 59
3.3.4 Eficácia da Inativação LEDs – UV em Diferentes Comprimentos de Onda 62
3.3.5 Sensibilidade dos microrganismos a LEDs UV –constante de inativação (k) 74

4 METODOLOGIA 79

4.1 CULTIVO E ENUMERAÇÃO DE MICRORGANISMOS 79
4.1.1 E. coli 79
4.1.2 Bacteriófagos 80
4.1.3 Quantificação Viral de SARS-CoV e Vaccínia Vírus 81
4.1.4 Quantificação Viral de Adenovírus Humano Tipo II e Herpes Vírus Simples 82
4.2 APARATO PARA LED UVC E DETERMINAÇÃO DA DOSE 83
4.3 PROCEDIMENTO DE INATIVAÇÃO POR LED – UVC 84
4.3.1 Procedimento para Bacteriófagos e E.coli 85
4.3.2 Procedimento para SARS-CoV e Vaccínia Vírus 85
4.3.3 Procedimento para HAdV-II e HSV-1 86
4.3.4 Experimentos de reativação para E.coli e Bacteriófago 86
4.3.5 Determinação do consumo de energia elétrica por log de inativação 87
4.3.6 Desenvolvimento de Dispositivo de Inativação 87
4.3.6.1 Simulação Numérica 88
4.3.6.2 Validação da Eficiência do Aparato 90
4.3.6.3 Eficiência de Inativação para Amostra Real 91
4.3.7 Cinética de Inativação e Análise Estatística 93

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 95

5.1 INATIVAÇÃO DE BACTERIÓFAGOS E *E.COLI* POR DIODOS EMISSORES DE LUZ ULTRAVIOLETA – LED UVC 95
5.2 INATIVAÇÃO DE SARS-COV-2, HERPES HUMANO SIMPLES, VACCÍNIA VÍRUS E ADENOVÍRUS HUMANO TIPO II EM ÁGUA USANDO LED-UVC 101
5.3 SISTEMA DE DESINFECÇÃO POR LED - UVC PARA INATIVAÇÃO DE PATÓGENOS EM ÁGUA DE CONSUMO EM LOCAIS DESPROVIDOS DE SISTEMA TRADICIONAIS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 112

6 CONCLUSÕES 117

7 REFERÊNCIAS 119

1 INTRODUÇÃO

A contaminação microbiológica por organismos patogênicos ou indicadores de contaminação fecal, como bactérias, vírus e protozoários, está frequentemente associada ao lançamento de despejos domésticos, industriais e agropecuários, com ou sem tratamento prévio. Esse tipo de poluição compromete o acesso seguro à água, especialmente em áreas onde o tratamento adequado não é realizado, seja por entidades públicas ou privadas.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2022), em 2020, cerca de 5,8 bilhões de pessoas tinham acesso à água potável, ou seja, água disponível conforme a necessidade e livre de contaminação. No entanto, aproximadamente 2 bilhões de pessoas ainda dependiam de fontes de água não seguras, sendo 1,482 bilhão de pessoas com acesso a fontes melhoradas localizadas a mais de 30 minutos de distância de suas residências, 368 milhões com acesso a poços ou nascentes desprotegidos, e 122 milhões com acesso a água bruta proveniente de rios, lagos, lagoas e córregos. Esses dados ressaltam a necessidade contínua de melhorar o acesso à água potável e de implementar medidas eficazes de tratamento e saneamento para proteger a saúde pública.

Dentre os riscos associados ao consumo de água não potável, destaca-se a contaminação microbiológica por microrganismos patogênicos, com ênfase especial nos vírus, como os enterovírus, além de indicadores de contaminação fecal, como *E. coli* e enterococos. A ingestão dessas águas pode resultar em uma série de problemas de saúde, como gastroenterite, encefalite e hepatite (PANIZZOL et al., 2023).

Além da contaminação comum das fontes de água, eventos excepcionais, como acidentes químicos, biológicos e pandemias/epidemias, também representam riscos significativos. Durante surtos epidêmicos ou pandêmicos, os vírus desempenham um papel crucial no desenvolvimento de doenças, devido à facilidade de transmissão e ao grande número de vítimas contaminadas (Bui et al., 2022). Ademais, como observado por Martino et al. (2021), o aumento da população mundial e a maior interconectividade global ampliam os riscos de transmissão de doenças por diversas vias, incluindo as veiculadas pela água (ex.: adenovírus, norovírus, rotavírus e *E. coli* patogênicas), alimentos (ex.: *Campylobacter* e *Salmonella*) e de pessoa a

pessoa (ex.: coronavírus e Ebola). Esses estudos enfatizam a importância de considerar uma gama diversificada de fatores e cenários ao lidar com a segurança da água e a saúde pública.

O monitoramento viral é amplamente reconhecido como crucial, dado o potencial desses vírus de causar danos à saúde, especialmente problemas respiratórios e gastrointestinais. Vírus como adenovírus, *calicivírus* (norovírus) e *enterovírus* (polióvirus, coxsackievírus e echovírus) têm o potencial de afetar gravemente a saúde, especialmente em grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas imunossuprimidas. Devido a isso, esses vírus foram recentemente adicionados à lista de contaminantes prioritários – CCL5 da USEPA (USEPA, 2022), que elenca contaminantes potenciais que atualmente não estão sujeitos a nenhuma regulamentação para o monitoramento de água potável, porém, são reconhecidamente capazes de prevalecer em sistemas públicos de água potável.

Os vírus são organismos microscópicos com diâmetros que variam de 5 a 300 nm, consistindo em um núcleo de material genético (RNA ou DNA) envolto por uma cápsula proteica. Alguns vírus também possuem um envelope externo composto por uma bicamada de fosfolipídios. Entre os vírus de veiculação hídrica, o adenovírus humano (HAdV) é um patógeno de grande interesse para o monitoramento da poluição das águas, devido à sua alta abundância no esgoto, sua resistência ao ambiente e sua potencial infecciosidade (VERANI et al., 2019). Estudos indicam que o HAdV pode persistir por períodos prolongados em ambientes aquáticos, aumentando o risco de contaminação e transmissão para seres humanos.

Os adenovírus pertencem à família *Adenoviridae* e possuem DNA de cadeia dupla, sendo desprovidos de envelope. Atualmente, 88 tipos distintos de adenovírus humanos (HAdV) foram categorizados em sete espécies (A-G), com a espécie HAdV-D contendo a maioria, abrangendo 57 tipos (DHINGRA et al., 2019). Esses vírus são responsáveis por uma ampla gama de doenças, incluindo problemas respiratórios, gastrointestinais e infecções do trato urinário. Além disso, muitas infecções por adenovírus podem ser assintomáticas. Importante destacar que todos os sorotipos de adenovírus podem ser excretados em alta concentração nas fezes de indivíduos infectados (SILVA; GARCÍA-ZAPATA; ANUNCIAÇÃO, 2011).

Considerando a importância sanitária dos vírus e dos indicadores de contaminação fecal, a irradiação ultravioleta (UV) tem sido cada vez mais utilizada devido à sua alta eficiência na

inativação de uma variedade de vírus, como adenovírus e rotavírus, além de outros patógenos, incluindo os oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*, que são altamente resistentes à cloração (HIJNEN; MEDEMA, 2005). Essa técnica oferece uma abordagem promissora para a desinfecção de água e superfícies, desempenhando um papel importante na prevenção de doenças infecciosas e na promoção da segurança sanitária em diversos contextos.

O espectro UV é dividido em quatro faixas distintas: UV-vácuo (100-200 nm), UV-C (200-280 nm), UV-B (280-315 nm) e UV-A (315-400 nm). A inativação microbiológica ocorre principalmente na faixa do UV-C, devido à forte absorção pelos nucleotídeos, particularmente as pirimidinas, com pico de absorção em torno de 260 nm. Essa absorção induz danos ao DNA, como a formação de dímeros de pirimidinas, o que impede a replicação dos microrganismos (USEPA, 2006)

Tradicionalmente, os sistemas de desinfecção de água utilizam lâmpadas de vapor de mercúrio, incluindo as de baixa pressão (LP), que emitem luz monocromática em torno de 254 nm (próximo ao pico de absorção do DNA), e as de média pressão (MP), que emitem luz policromática entre 200 e 400 nm. No entanto, as lâmpadas MP não estão dentro da faixa ideal de 260-265 nm para inativação eficaz do DNA dos microrganismos (CHEVREMONT et al., 2012b; USEPA, 2003; JENNY et al., 2015).

De acordo com Minh Tran et al., (2022), o adenovírus é o patógeno humano mais comumente encontrado nos esgotos sanitários, demonstrando uma resistência significativa à radiação UV em comparação com outros vírus. Para sua inativação, são necessárias doses elevadas de UV, como 160 mJ/cm² para reduzir 4 logs quando exposto à radiação UV com emissão em 254 nm. No entanto, comprimentos de onda mais longos, como 270 nm e 280 nm, podem inativar o adenovírus com doses menores. A sensibilidade do adenovírus à radiação UV aumenta consideravelmente em comprimentos de onda abaixo de 240 nm, onde doses de até 20 mJ/cm² são suficientes para reduzir 3 logs.

Embora eficazes na inativação de microrganismos, as lâmpadas de mercúrio apresentam riscos significativos à saúde humana e ao meio ambiente devido à sua composição com mercúrio. Além disso, apresentam desvantagens consideráveis, como alta fragilidade, sensibilidade às variações de temperatura, dificuldade de modulação devido ao seu tamanho, altas temperaturas de operação, alto consumo de energia, desafios no projeto de câmaras de inativação com

irradiação uniforme e vida útil reduzida (CHEN; LOEB; KIM, 2017; CHEVREMONT et al., 2012b; KIM; KIM; KANG, 2017; NGUYEN et al., 2019; SONG; MOHSENI; TAGHIPOUR, 2016).

Recentemente, com o avanço da indústria de semicondutores, os Diodos Emissores de Luz UV-C (LEDs-UV-C) têm se consolidado como uma alternativa promissora às fontes tradicionais de radiação UV. Os LEDs oferecem inúmeras vantagens em comparação com as lâmpadas convencionais, como tamanho reduzido (aproximadamente 1 mm^2), fácil integração aos sistemas de desinfecção, ausência de mercúrio, maior resistência física, vida útil mais longa, capacidade de emitir em comprimentos de onda específicos, maior eficiência energética, operação a temperaturas mais baixas, facilidade de acionamento/desligamento e emissão instantânea sem necessidade de tempo de aquecimento (BECK et al., 2017; CHEVREMONT et al., 2012b; JENNY et al., 2015; SONG; MOHSENI; TAGHIPOUR, 2016; TAKAHASHI et al., 2020; WÜRTELE et al., 2011).

Como alternativa a processos convencionais de desinfecção, como a cloração e a inativação por lâmpadas UV de MP e LP, os LEDs UV têm sido objeto de estudo nos últimos anos devido ao seu baixo custo e seu caráter ambientalmente amigável para a inativação de microrganismos presentes em águas destinadas ao consumo humano, reuso e efluentes finais de sistemas de tratamento de esgoto sanitário. Lâmpadas UV-LED com comprimento de onda de 265 nm podem inativar eficazmente microrganismos na água, como *Cryptosporidium,* o bacteriófago MS2 e *Bacillus pumilus*, devido à alta sensibilidade à radiação UV na faixa de 260-265 nm. Além da alta eficiência de inativação, os LEDs UV-LED possuem tempo de aquecimento reduzido, menor pegada ecológica e maior durabilidade em comparação com lâmpadas de mercúrio convencionais (TRAN et al., 2021)

A tecnologia LED tem sido aplicada na desinfecção de bactérias, incluindo indicadores de contaminação fecal, e vírus em diversas matrizes, como metais, plásticos, tecidos, papéis e, principalmente, água. Sua aplicação pode ser realizada tanto em sistemas de batelada quanto em fluxo contínuo, demonstrando eficiência comparável às fontes tradicionais de UV. Além disso, essa tecnologia tem sido aplicada com sucesso em estações de tratamento de água em escala real (OGUMA; RATTANAKUL, 2021).

Diante do crescente interesse e da aplicação crescente da tecnologia LED-UVC para a inativação de microrganismos em águas, este estudo visa investigar a eficácia de inativação de duas cepas de *E. coli* resistentes a antibióticos e dos bacteriófagos MS2 e φx174, utilizando LEDs operando em comprimentos de onda específicos (265 nm e 275 nm). Além disso, busca-se contribuir para a literatura atual e futura ao apresentar dados sobre a inativação dos vírus adenovírus humano tipo II (HAdV), Herpes simplex 1 (HSV), SARS-CoV-2 (CoV) e vírus vaccínia (VACV), utilizando LEDs UV. Esses dados são essenciais para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de inativação e para o avanço do conhecimento sobre o uso da radiação UV como medida de controle de infecções virais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar a aplicabilidade de um dispositivo de desinfecção de água baseado na tecnologia LED UVC para inativação de patógenos em pontos de consumo domiciliares de água, em comunidades não servidas por sistema de abastecimento de água.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a potencialidade dos LEDs-UV operando em comprimento de onda de 265 nm e 275 nm para inativação de *E. coli* e bacteriófagos, Adenovírus Humano tipo2, SARS-CoV-2, Herpes Vírus Simples e Vaccínia Vírus em amostras de água com diferentes níveis de turbidez;
- Realizar análise do consumo de energia gasto para inativação de bactérias e bacteriófagos;
- Desenvolver um protótipo de tecnologia móvel com LEDs UV-C para inativação de microrganismos indicadores em água destinada ao consumo sem tratamento convencional.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Na história do tratamento de água para consumo humano, Azevedo Netto et al. (1976) afirmaram que a primeira instalação coletiva de tratamento de água foi projetada por John Gibb, na Escócia, em 1804. Em 1828, Londres já contava com conjuntos de filtros lentos para abastecer parte da cidade. A ideia de desinfecção da água com cloro, como conhecemos hoje, foi introduzida em 1905 por Sir Houston, que utilizou a cloração durante uma epidemia de febre tifoide em Lincoln, na Inglaterra.

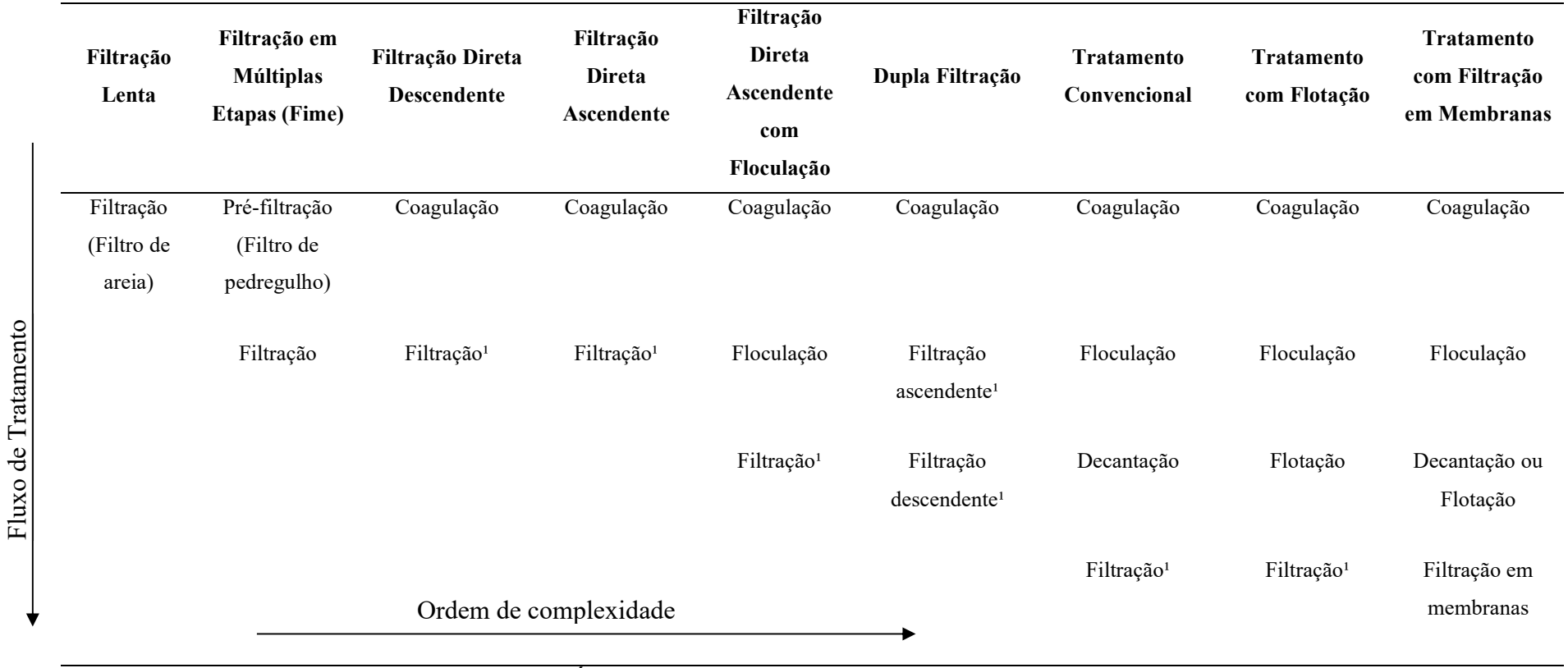
Atualmente, a purificação da água pode ser realizada por meio de técnicas físicas, químicas e biológicas, que podem ser utilizadas de forma isolada ou combinada, dependendo da natureza da água a ser tratada e do padrão de potabilidade exigido.

No Brasil, o tratamento de água é atualmente realizado principalmente por meio de estações de tratamento de ciclo completo, conhecidas como Estações de Tratamento Convencionais. Em menor frequência, também são utilizadas estações de filtração direta. Esses tratamentos consistem na combinação de processos físicos e químicos que visam remover turbidez, microrganismos associados aos sólidos e compostos químicos presentes na água. A Figura 1 apresenta as principais técnicas de tratamento de água. Após o tratamento da água, independentemente da tecnologia utilizada, são comumente adotadas três etapas finais:

Fluoretação: Esta é uma tecnologia de saúde pública que consiste na adição de flúor à água tratada, com o objetivo de prevenir a cárie dentária.

Estabilização química: Esta etapa envolve a correção do pH da água distribuída pela rede de abastecimento, prevenindo corrosão ou incrustação nas tubulações. Isso ajuda a prolongar a vida útil da canalização, além de evitar problemas relacionados à pressão de abastecimento, turbidez e coloração.

Desinfecção: Essa tecnologia garante a qualidade microbiológica da água, evitando a veiculação de microrganismos patogênicos no sistema de abastecimento, especialmente em casos de rompimento ou perfuração das canalizações. A desinfecção é realizada através da inativação de patógenos com um desinfetante, geralmente o dióxido de cloro, em concentrações que garantam a manutenção de um residual na rede de distribuição.



Filtração Lenta	Filtração em Múltiplas Etapas (Fime)	Filtração Direta Descendente	Filtração Direta Ascendente	Filtração Direta Ascendente com Floculação	Dupla Filtração	Tratamento Convencional	Tratamento com Flotação	Tratamento com Filtração em Membranas
Filtração (Filtro de areia)	Pré-filtração (Filtro de pedregulho)	Coagulação	Coagulação	Coagulação	Coagulação	Coagulação	Coagulação	Coagulação
	Filtração	Filtração[1]	Filtração[1]	Floculação	Filtração ascendente[1]	Floculação	Floculação	Floculação
				Filtração[1]	Filtração descendente[1]	Decantação	Flotação	Decantação ou Flotação
						Filtração[1]	Filtração[1]	Filtração em membranas

Figura 1 – Principais Técnicas de Tratamento de Água. [1] Exemplo de composição de meio filtrante (Filtros de dupla camada, exemplo areia e antracito. Filtro de areia).

Fonte: Adaptado de Pádua (2010).

Segundo Pádua (2010), a desinfecção da água possui um caráter tanto corretivo quanto preventivo. No aspecto corretivo, busca-se a eliminação de organismos patogênicos presentes na água, incluindo bactérias, protozoários e vírus. Por outro lado, mantém-se um residual do desinfetante na água fornecida à população para atuar preventivamente em caso de contaminação na rede de distribuição, além de indicar a qualidade da água que está sendo distribuída.

É importante destacar que a desinfecção, como processo de tratamento de água, não inativa todos os microrganismos, mas apenas alguns patógenos específicos. A remoção completa de todos os microrganismos é alcançada por meio da esterilização.

Segundo Libânio (2010), a desinfecção é praticamente a última etapa do tratamento de água, visando produzir água de consumo isenta de microrganismos patogênicos. A inativação desses patógenos é realizada por meio de agentes físicos e/ou químicos. Pode-se afirmar que a desinfecção finaliza o processo de potabilização, sucedendo, quando a tecnologia convencional de tratamento é empregada, as fases de clarificação e filtração.

Embora as demais etapas da potabilização reduzam o número de microrganismos associados às partículas suspensas e coloidais removidas durante a decantação/flotação e filtração, esse não é o objetivo principal dos processos e operações unitárias usuais no tratamento de águas de abastecimento. Assim, cabe à desinfecção a responsabilidade de inativar microrganismos patogênicos — e organismos indicadores — que possam estar presentes na água, além de prevenir o crescimento microbiológico nas redes de distribuição.

A desinfecção de águas destinadas ao consumo humano pode ser realizada por dois grupos principais de desinfetantes: agentes químicos e físicos. Os agentes químicos incluem cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, ácido acético, bromo, iodo, permanganato de potássio, cloreto de bromo e ozônio. Já os agentes físicos referem-se à energia de radiação, destacando-se a radiação UV, radiação gama, radiação solar e, em nível domiciliar, a fervura (LIBÂNIO, 2010). O Quadro 1 apresenta as principais características dos agentes desinfetantes.

Item	Desinfetante				
Eficácia para desinfecção:	**Cloro livre**	**Cloro combinado**	**Dióxido de cloro**	**Ozônio**	**Luz ultravioleta**
Bactérias	Excelente	Bom	Excelente	Excelente	Bom
Vírus	Excelente	Razoável	Excelente	Excelente	Razoável
Protozoários	Razoável a fraco	Fraco	Bom	Bom	Excelente
Endósporos	Bom a fraco	Fraco	Razoável	Excelente	Razoável
Limite regulatório sobre resíduos	0,2 mg/L	2 mg/L	0,2 mg/L	-	-
Subprodutos regulamentados	Forma 4 THMs e 5 HAAs	Traços de THMs e HAAs	Clorito	Bromato	-
Subprodutos que podem ser regulados no futuro	Diversos	Halogenetos de cianogênio, NDMA	Clorato	Carbono orgânico biodegradável	Desconhecidos
Dose típica de aplicação, mg/L (kg/ml)	1-6	2-6	0,2-1,5	1-5	20-100 mJ/cm²
Dose típica de aplicação, lb/mg	8-50	17-50	2-13	8-42	-
Fonte química	Entregue como gás líquido em caminhões tanque, cilindros de 1 tonelada e 68 kg (150 libras), ou alvejante líquido. Geração no local, a partir de sal e água usando eletrólise. Hipoclorito de cálcio em pó é usado para pequenas aplicações.	As mesmas fontes para o cloro. A amônia é entregue como solução, gás liquefeito em cilindros ou sulfato de amônia sólido. O cloro e a amônia são misturados no processo de tratamento	ClO_2 é fabricado no local a partir do cloro e do clorito. As mesmas fontes para o cloro. Clorito como pó ou solução líquida estabilizada.	Fabricado no local através da passagem de oxigênio puro ou de ar seco através de um campo elétrico. Geralmente, o oxigênio é fornecido como um líquido. O oxigênio também pode ser fabricado no local.	Usa-se baixa pressão ou UV de baixa pressão, alta intensidade (254 nm) ou lâmpadas UV de média pressão (vários comprimentos de onda) no próprio contator.

Quadro 1 – Principais características dos agentes desinfetantes.
Fonte: Adaptado de HOWE *et al*. (2016)

A ação dos agentes desinfetantes sobre os microrganismos pode ser explicada por um ou mais dos seguintes cinco mecanismos principais: 1) danos à parede celular; 2) alteração da permeabilidade da célula; 3) modificação da natureza coloidal do citosol no interior da célula; 4) alteração do DNA ou RNA dos organismos e 5) inibição da atividade enzimática no citosol (METCALF e EDDY, 2016). O Quadro 2 apresenta a ação dos principais mecanismos associados aos desinfetantes mais conhecidos.

De acordo com Libânio (2010), a eficiência da desinfecção depende da combinação de características do desinfetante, da água, do tipo de microrganismo a ser inativado e da instalação onde o processo será realizado. As características intrínsecas de cada desinfetante, especialmente em relação aos seus mecanismos de ação e às propriedades que interagem com as características físicas, químicas e biológicas da água, influenciam significativamente a eficácia do processo.

A eficiência da desinfecção depende de diversos fatores, como o tempo de contato com a água, a dosagem, o tipo de agente químico, a intensidade e a natureza do agente físico utilizado, além dos tipos de organismos presentes (Pádua, 2010). Patógenos em formas esporuladas e encistadas são especialmente resistentes. A dosagem, o tempo de contato e o tipo de agente desinfetante devem ser determinados preferencialmente por meio de ensaios, levando em consideração o potencial de formação de subprodutos indesejados durante o processo e os riscos sanitários que podem surgir.

Em relação à qualidade da água tratada, Libânio (2010) a turbidez desempenha um papel crucial na eficiência da desinfecção, agindo como um "efeito-escudo" sobre os microrganismos, que os protege da ação dos desinfetantes físicos ou químicos. Diversas pesquisas confirmaram que a remoção bacteriana na desinfecção com compostos de cloro é menor quando a turbidez ultrapassa 1,0 uT. Os padrões de potabilidade nacionais e internacionais corroboram essa afirmação. Além da turbidez, outras características da água também interferem na eficiência da desinfecção, especialmente quando realizada com agentes químicos:

- a presença de matéria orgânica, frequentemente associada a cor verdadeira - aderindo aos microrganismos e protegendo-os da ação do desinfetante ou reagindo com este para formar subprodutos;
- a presença de compostos inorgânicos, como ferro e manganês, que reagem com o desinfetante;

- a temperatura da água e o pH, especialmente quando do emprego dos compostos de cloro como desinfetante.

Cloro	Ozônio	Radiação UV	Pasteurização
1. Oxidação direta da parede celular, com liberação do conteúdo da célula para o meio líquido	1. Oxidação direta da parede celular, com liberação do conteúdo da célula para o meio líquido	1. Danos ao DNA e ao RNA (formação de ligações duplas) no interior das células dos organismos	1. A estrutura das enzimas das células é alterada pelo calor (desnaturação), inativando as células.
2. Modificação da permeabilidade da parede celular	2. Reações com os radicais produzidos na decomposição do ozônio	2. Os ácidos nucleicos nos microrganismos são os que mais absorvem energia nos comprimentos de onda variando de 240- 280 nm	2. A estrutura de proteínas e ácidos graxos da parede celular é danificada pelo calor, liberando o conteúdo das células para o líquido
3. Alteração do protoplasma da célula	3. Danos aos constituintes do ácido nucleico	3. Como o DNA e o RNA mantêm as informações para a reprodução dos microrganismos, os danos causados inativam os organismos	3. Os fluidos dentro da célula podem expandir e romper a parede da célula, liberando o seu conteúdo para o meio líquido
4. Inibição da atividade enzimática			
5. Danos ao DNA e ao RNA			

Quadro 2 – Mecanismos de desinfecção utilizando cloro, ozônio, radiação UV e pasteurização**. Fonte:** Metcalf e Eddy (2016)

Uma vez conhecida as características físico-químicas e a diversidade microbiológica presente na água, para a escolha do desinfetante ideal para o tratamento de água, usualmente, deve-se levar em consideração os seguintes pontos acerca do agente desinfetante, que:

- deverá ser capaz de inativar os microrganismos patogênicos;
- não deverá ser tóxico ao meio ambiente e aos consumidores, bem como não deverá produzir sabor, cor e odor na água desinfetada;
- no caso de agente químico, deverá ser capaz de produzir residual na água tratada, não reativo com os materiais comumente empregados nas redes de distribuição, assegurando, assim, a qualidade da água na rede de distribuição em eventuais episódios de contaminação;
- no caso de agente químico, possuir metodologia para determinação da concentração, preferencialmente de forma simplificada o que poderá facilitar a manutenção dos valores determinados nos padrões de potabilidade mesmo em cidades de difícil acesso;
- não possuir custo global elevado (agente desinfetante, instalação e operação), ser de fácil aquisição no mercado, o cloro, em suas diversas formas, tornou-se o agente químico

desinfetante mais amplamente utilizado no tratamento de águas de abastecimento e em águas residuárias em todo o mundo, devido à sua capacidade de atender a praticamente todos os critérios de eficácia. Essa predominância resultou na associação do processo de desinfecção à cloração. Além de apresentar um amplo espectro de ação germicida, o cloro possui a característica única de formar compostos que permanecem na água, garantindo um residual desinfetante ativo. Isso permite a inativação de microrganismos após o ponto de aplicação, tanto ao longo das tubulações da rede de distribuição quanto nos reservatórios domiciliares nos pontos de consumo.

Considerando os problemas potenciais associados à cloração, além da baixa eficácia germicida contra microrganismos como protozoários e algumas bactérias resistentes ao cloro, o uso de desinfetantes físicos, como a luz UV, poderia ser uma alternativa viável tanto para o Brasil quanto para o mundo. A luz UV possui um amplo espectro germicida e não gera subprodutos da desinfecção, o que a torna uma opção atraente. Nesse contexto, a cloração poderia ser utilizada apenas para a manutenção de um residual nas redes de distribuição, servindo como uma ferramenta de segurança para garantir a qualidade da água.

3.1 Evolução Histórica e Princípios básicos da radiação UV

Entre os agentes físicos utilizados na desinfecção de águas de abastecimento, a radiação UV é, sem dúvida, a mais amplamente aplicada (LIBÂNIO, 2010). Segundo a USEPA (2006), o interesse no uso da radiação UV para a desinfecção de água potável está crescendo entre os sistemas públicos de tratamento de água devido à sua capacidade de inativar microrganismos patogênicos sem gerar subprodutos da desinfecção. Essa tecnologia tem demonstrado eficácia contra organismos patogênicos, como o *Cryptosporidium*, que são resistentes a desinfetantes comumente utilizados, como o cloro.

O efeito germicida da radiação UV foi descoberto em 1877 por Downes e Blunt, que associaram esse efeito à radiação solar, a fonte natural de UV. Embora a UV tenha sido reconhecida como uma alternativa para desinfecção desde o início do século passado, seu uso foi abandonado devido a problemas de confiabilidade dos equipamentos e da tecnologia disponível na época. Com o tempo, à medida que a maioria desses problemas foi superada, o método de desinfecção por radiação ultravioleta começou a ganhar popularidade, especialmente nos países europeus, e a pesquisa e o desenvolvimento dessa tecnologia aumentaram significativamente. Um dos

fatores importantes para sua popularização é o custo, que torna a radiação UV competitiva em relação à cloração (DANIEL et al., 2001).

De acordo com a USEPA (2006), com o desenvolvimento das lâmpadas de mercúrio como fonte artificial de UV em 1901 e o uso do quartzo como material transmissor de UV em 1906, a primeira instalação para desinfecção de água potável foi inaugurada em Marselha, França, em 1910. Em 1929, Gates identificou a relação entre a desinfecção por UV e a absorção de luz UV por ácidos nucleicos, o que resultou no desenvolvimento de lâmpadas tubulares germicidas na década de 1930, acompanhando a evolução das lâmpadas fluorescentes.

Com o desenvolvimento de pesquisas sobre os mecanismos de desinfecção e inativação de microrganismos por luz UV durante a década de 1950, as primeiras aplicações confiáveis de UV para desinfecção de água potável em abastecimento municipal ocorreram na Suíça e na Áustria em 1955. Em 1985, o número de instalações de UV para tratamento de água potável nesses países chegava a aproximadamente 500 e 600. A partir da observação da formação de subprodutos da desinfecção por cloro em 1974, a desinfecção de águas de abastecimento por UV tornou-se popular na Noruega e na Holanda, com as primeiras instalações construídas em 1975 e 1980 (USEPA, 2006). Já em 1996, havia mais de 2000 sistemas de desinfecção UV para tratamento de água potável na Europa (USEPA, 2003), além de cerca de 1000 sistemas nos Estados Unidos, utilizados isoladamente ou em combinação com outros desinfetantes secundários (USEPA, 1996).

Até o presente momento, não há registros na literatura sobre o uso da tecnologia UV para tratamento de água em estações de tratamento de água no Brasil em escala plena.

A luz ultravioleta é o termo utilizado para designar a radiação eletromagnética que se situa entre os raios X (com comprimento de onda mais curto) e a luz visível (com comprimento de onda mais longo), abrangendo ondas com comprimento entre 100 e 400 nm.

A Figura 2 ilustra as regiões do espectro eletromagnético e a definição da faixa UV.

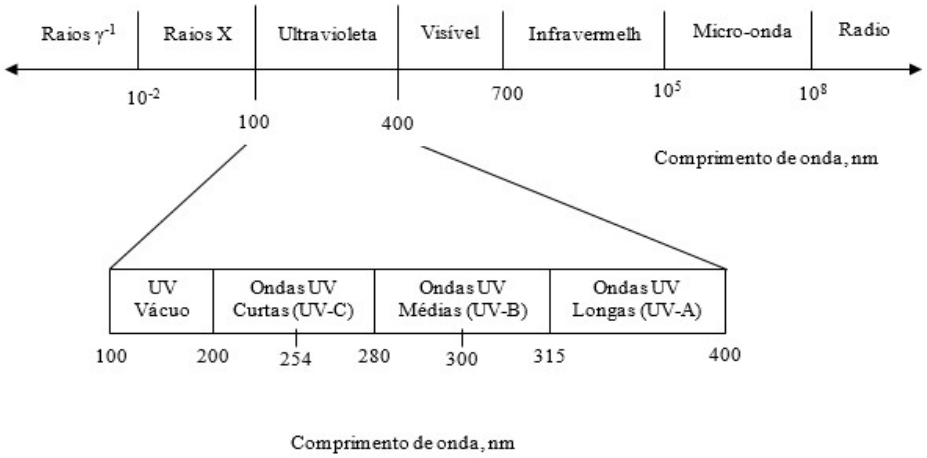


Figura 2 – Localização da região da luz ultravioleta dentro do espectro eletromagnético. Fonte: Howe et al. (2016)

O espectro eletromagnético da radiação UV é comumente divido em quatro regiões (USEPA, 1996; HOWE et al., 2016):

- UV-A com comprimento de ondas entre 315 e 400 nm: a ação germicida nesse comprimento de onda é muito pequena quando comparada com as demais, sendo por isso, necessário um longo tempo de exposição para que seja eficaz como desinfetante. Esse tipo de radiação ativa os melanócitos da pele para produzir melanina, sendo conhecida popularmente como luz negra, geralmente utilizada em fototerapia e câmaras de bronzeamento.

- UV – B com comprimento de ondas entre 280 e 315 nm: a radiação nessa faixa de comprimento apresenta efeito germicida superior ao UV-A, no entanto, ainda, demanda um tempo relativamente longo para desinfecção. A radiação UV-B, assim como a UV-A, ativa os melanócitos da pele, porém, por se tratar de ondas mais curtas, longos períodos de exposição podem levar a queimaduras na pele (queimaduras de sol) e câncer de pele. No entanto, cabe destacar que na faixa entre 280 e 300 nm a UV-B é percussora da Vitamina D no organismo.

- UV – C com comprimento de ondas entre 200 e 280 nm: a radiação nessa faixa de comprimento, dentre as apresentadas anteriormente, é a que apresenta maior efeito germicida, sendo comumente utilizada em desinfecção de água para abastecimento. A radiação UV- C é absorvida pelo DNA e é a que tem maior probabilidade de causar câncer de pele.

- UV – Vácuo com comprimento de ondas entre 100 e 200 nm: embora a luz UV na região do vácuo possa ser usada como desinfetante, o seu uso é impraticável em sistemas de desinfecção de água para abastecimento, dada sua rápida dissipação em meio líquido em

pequenas distâncias. Como a radiação nessa região não pode penetrar no meio líquido de forma eficaz, é considerada não germicida.

Segundo Daniel *et al* (2001), o intervalo de comprimento de onda compreendido entre 245 e 285 nm é considerado a faixa germicida ideal para a inativação de microrganismos. No entanto, Metcalf e Eddy (2016) afirmam que a radiação UV com comprimento de onda entre 255 e 265 nm é a mais eficaz para essa inativação. Para Libânio (2006), a eficiência da radiação UV como agente desinfetante é especialmente destacada no comprimento de onda de 253,7 nm.

Como regra geral, quanto maior a energia associada a cada fóton na radiação eletromagnética, mais perigosa ela é para os organismos vivos. Assim, a luz visível e a radiação infravermelha têm relativamente pouco efeito sobre os organismos, enquanto os raios X e a radiação gama (γ) podem ser extremamente perigosos (HOWE et al., 2016).

A energia associada ao fluxo de fótons na luz é comumente relacionada à capacidade de fotólise da fonte de energia luminosa. Segundo Daniel et al. (2001), o termo fotólise refere-se à interação da radiação luminosa com as moléculas, provocando a ruptura das ligações químicas e fragmentando-as. A luz é composta por pequenos "pacotes" de energia, chamados fótons, cuja energia, E, é inversamente proporcional ao comprimento de onda, λ, da luz (Equação 1):

$$E = \frac{h.C}{\lambda} \quad (1)$$

onde, h = constente de Planck ($6{,}026.10^{-34}$), Js
C = velocidade da luz, m/s
λ= comprimento de onda, m

Para que a absorção de um fóton por uma molécula promova a fotólise (fragmentação), o fóton deve ter energia suficiente para romper uma ou mais ligações específicas entre os átomos que compõem a molécula. Esse fenômeno está geralmente associado a comprimentos de onda na região do espectro correspondente à radiação ultravioleta. Compostos que absorvem radiação ultravioleta e apresentam um alto rendimento quântico de fotólise são considerados bons candidatos para fotodegradação. (DANIEL et al., 2001). Além disso, complementa-se que, pode haver um desvio da luz incidente para um intermediário (fotossenbilizador) que ao ser excitado reage gerando radicais oxidantes que são capazes de decompor outras moléculas presentes no meio.

Historicamente, a radiação UV artificial tem sido gerada pela aplicação de uma tensão em uma mistura de gases, resultando em uma descarga de fótons. Os comprimentos de onda específicos emitidos dependem da composição dos gases e da potência da lâmpada. Comumente, as lâmpadas UV fabricadas para o tratamento de água utilizam uma mistura gasosa contendo vapor de mercúrio, que é vantajoso para sistemas de desinfecção UV, pois emite luz nos comprimentos de onda da região germicida do espectro (USEPA, 2006). Por essa razão, são frequentemente utilizadas lâmpadas UV de baixa pressão de vapor de mercúrio — ou monocromáticas — que emitem de 85 a 90% de radiação no comprimento de onda de 254 nm (LIBÂNIO, 2010). No entanto, outros gases como o xenônio também podem ser utilizados, pois emitem luz na mesma região germicida do espectro (USEPA, 2006).

3.2 Inativação por radiação UV

3.2.1 Fontes artificiais de radiação UV

As fontes artificiais comumente utilizadas na desinfecção por UV são as lâmpadas de arco de mercúrio, que consistem em um tubo hermético de sílica ou quartzo (ambos transmissores de UV), com eletrodos, geralmente de tungstênio, nas extremidades, juntamente com uma mistura de terra alcalina que facilita a formação do arco interno da lâmpada. O tubo é preenchido com uma pequena quantidade de mercúrio e um gás inerte, geralmente argônio, que auxilia na partida da lâmpada, aumenta a vida útil dos eletrodos e reduz as perdas térmicas. Quando uma descarga elétrica é aplicada entre os eletrodos, a radiação UV é gerada(WRIGHT e CAIRNS, 1998).

A energia aplicada não apenas vaporiza o mercúrio, mas também excita os elétrons das camadas mais externas do átomo, fazendo com que eles sejam transferidos para camadas mais energéticas. Como esses elétrons se tornam instáveis nessa condição, eles retornam às camadas menos energéticas, liberando a energia adicional na forma de fótons de luz UV (METCALF e EDDY, 2016). Vale ressaltar que o argônio presente no interior da lâmpada não contribui para o rendimento espectral das lâmpadas (WRIGHT e CAIRNS, 1998). A Figura 3 apresenta um esquema da construção de uma lâmpada clássica de UV.

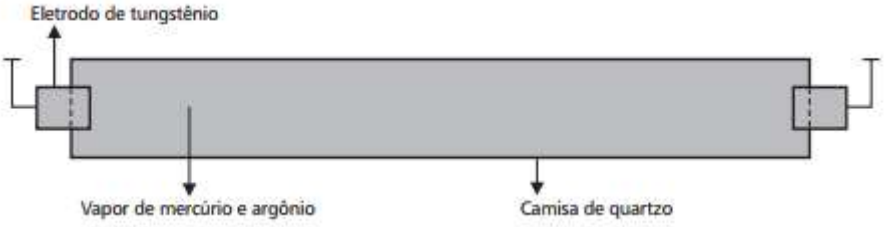


Figura 3 – Esquema de construção de lâmpadas clássicas de UV. Fonte: Daniel *et al.* (2001).

As unidades de desinfecção UV mais comumente usadas na indústria da água empregam três tipos diferentes de lâmpadas UV: (1) lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade; (2) lâmpadas de baixa pressão e de alta intensidade (também chamadas de lâmpadas de alto rendimento e baixa pressão) e (3) lâmpadas de alta intensidade e média pressão. O design dessas lâmpadas se aproxima da lâmpada fluorescente comum, facilitando sua integração em sistemas de tratamento de água (HOWE et al., 2016).

Segundo Daniel et al. (2001), as lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio (LP) e as lâmpadas fluorescentes operam com o mesmo princípio. A radiação UV é gerada na lâmpada a partir da descarga de elétrons entre os dois eletrodos, que excita os átomos do vapor de mercúrio em baixa pressão (aproximadamente 0,001 atm). A principal diferença entre essas lâmpadas é que o bulbo da lâmpada fluorescente é recoberto por um composto de fósforo, que converte a radiação ultravioleta em luz visível. Além disso, o bulbo é feito de vidro comum, que absorve a radiação UV, enquanto as lâmpadas de baixa pressão são projetadas para permitir a emissão de UV de forma eficiente.

De acordo com Howe et al. (2016), as lâmpadas de baixa e média pressão e alta intensidade são capazes de gerar uma quantidade maior de UV em um espaço equivalente, sendo que as lâmpadas de média pressão têm o maior rendimento. O espectro de saída de luz UV para as lâmpadas de baixa pressão é praticamente o mesmo, emitindo uma quantidade muito pequena de luz a 188 nm e a maior parte a 254 nm. Por outro lado, as lâmpadas de média pressão apresentam um espectro de saída com vários comprimentos de onda, oferecendo maior flexibilidade e eficácia na desinfecção. A Figura 4 ilustra esses espectros de rendimento para as lâmpadas de baixa e média pressão.

Segundo USEPA (2006), as lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade e as lâmpadas de baixa pressão e alta intensidade apresentam como vantagens: 1) maior eficiência germicida,

quase todo a produção de radiação no comprimento de onda de 254 nm; 2) menor consumo de energia por lâmpada; e 3) maior vida útil. Em contrapartida, as lâmpadas de média pressão e alta intensidade apresentam como vantagens: 1) maior potência; e 2) menor quantidade de lâmpadas para uma determinada aplicação.

Nos sistemas para desinfecção de água e efluentes, as lâmpadas são instaladas no interior de tubos de quartzo para isolar os componentes elétricos das lâmpadas do contato direto com a água e para controlar a temperatura na parede da lâmpada por meio de isolamento com ar, mantendo uma produção uniforme de radiação UV. Em outras configurações menos difundidas, a água ou o efluente a serem desinfetados passam através de tubos plásticos transparentes, que são circundados por lâmpada UV. A emissão de radiação UV diminui com o tempo em função da redução do número de elétrons no interior da lâmpada, da deterioração dos eletrodos e do envelhecimento do revestimento de quartzo. Lâmpadas com outras misturas de gases e sem eletrodos, como descrito a seguir, também são utilizadas para a geração de radiação UV (METCALF e EDDY, 2016).

A lâmpada UV pulsada é notável por gerar um espectro policromático de radiação, com intensidades estimadas em até 20.000 vezes maiores que a luz solar ao nível do mar, tornando-a altamente eficaz para desinfecção. Por outro lado, as lâmpadas *excimer*, que produzem radiação monocromática em comprimentos de onda específicos (172, 222 e 308 nm), utilizam diferentes gases, como xenônio e criptônio, para sua operação. As lâmpadas sem eletrodos geram radiação UV por meio de micro-ondas induzidas em uma mistura de argônio e mercúrio, o que permite uma produção contínua e eficiente de UV. Além disso, os LEDs UV estão em fase de desenvolvimento e prometem competir com as tecnologias convencionais de lâmpadas UV, oferecendo potencialmente uma alternativa mais compacta e eficiente para desinfecção. Essas inovações ampliam as opções disponíveis para sistemas de tratamento de água, com potencial para melhorar a eficácia e reduzir custos (METCALF e EDDY, 2016).

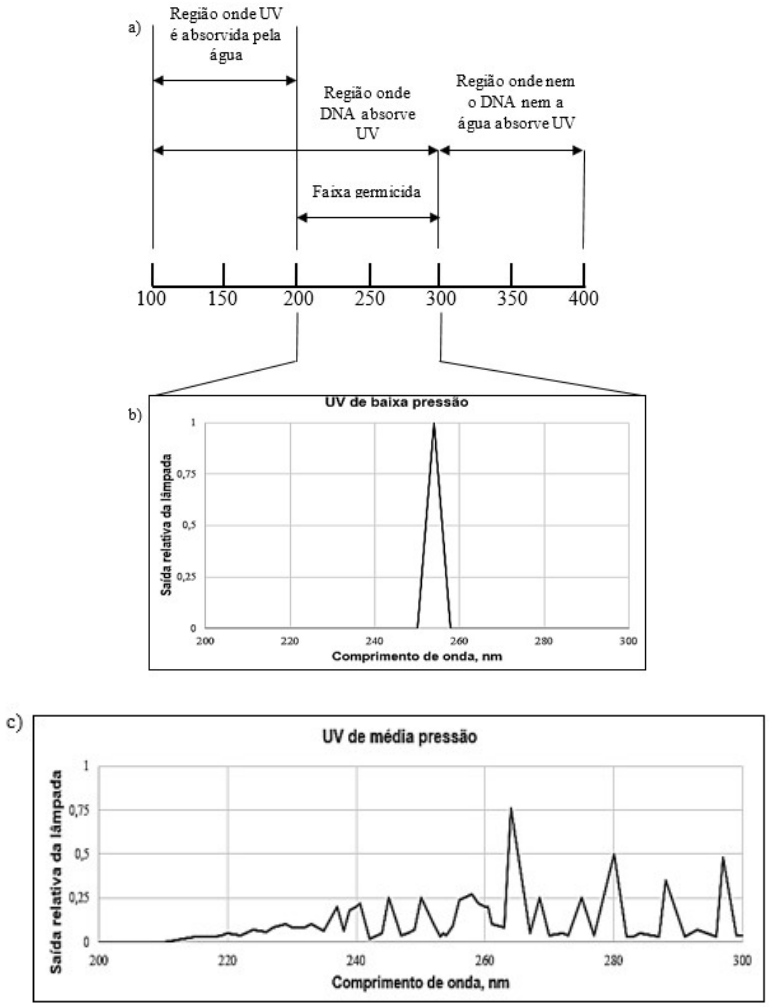


Figura 4 – a) Espectro eletromagnético, b) saída da luz UV de baixa pressão e c) saída da luz UV de média pressão. Fonte: Adaptado de Howe et al. (2016)

A Tabela 1 são apresentadas as informações sobre as características operacionais dos três tipos de lâmpadas UV.

A luz UV pode ser produzida por uma variedade de tecnologias, além das acima descrita, tais como lâmpadas de vapor de mercúrio sem eletrodos, lâmpadas de iodetos metálicos, lâmpadas de *xenon* (conhecidas também como lâmpadas de UV pulsado), lâmpadas *excimer*, UV lasers, e diodos emissores de luz (LED) (USEPA, 2006). Essas tecnologias ampliam as possibilidades de aplicação da luz UV na desinfecção de água e efluentes, cada uma com suas características específicas e vantagens.

Apesar da variação de picos de emissão apresentada pelas fontes artificiais de UV, a USEPA (1999) ressalta que o comprimento de onda ótimo para a efetiva inativação dos microrganismos encontra-se entre 250 e 270 nm.

Item	Unidade	Tipo de lâmpada		
		Baixa pressão e baixa intensidade	Baixa pressão e alta intensidade	Média pressão e alta intensidade
Consumo de energia	W	40-100	200-500[a]	1.000-13.000
Corrente elétrica	mA	350-550	Variável	Variável
Tensão	V	220	Variável	Variável
Intensidade germicida (líquida/total)	%	30-50	35-50	15-20[b]
Potência em 254 nm	W	25-27	60-400	100-2.000
Temperatura de operação	ºC	35-50	100-150	600-800
Pressão	mm Hg	0,007	0,01-0,8	10^2-10^4
Comprimento da lâmpada	M	0,75-1,5	1,8-2,5	0,3-1,2
Diâmetro da lâmpada	mm	15-20	Variável	Variável
Vida útil do tubo de quartzo	anos	4-6	4-6	1-3
Vida útil do reator	anos	10-15	10-15	3-5
Vida útil estimada da lâmpada	horas	8.000-12.000	9.000-15.000	3.000-8.000

[a] Até 1200 W em lâmpadas com alta potência, [b] Emissão na faixa germicida mais eficaz: 255 – 265 nm.

Tabela 1 - Características operacionais das lâmpadas UV. Fonte: Metcalf e Eddy (2016)

3.2.2 Mecanismo de inativação

Os mecanismos específicos de desinfecção por radiação ultravioleta (UV) são mais bem compreendidos do que os de qualquer outro desinfetante utilizado no tratamento de água (HOWE et al, 2016). Ao contrário dos desinfetantes químicos, como cloro e ozônio, que inativam os microrganismos por meio da destruição ou danificação de suas estruturas celulares — interferindo no metabolismo e dificultando a biossíntese e o crescimento — a radiação UV atua diretamente nos ácidos nucleicos. Essa interação provoca danos que interrompem o mecanismo de replicação dos microrganismos (USEPA, 2006).

O mecanismo de desinfecção por UV ocorre devido à absorção da radiação por proteínas e pelos ácidos nucléicos RNA e DNA (DANIEL et al., 2001). A radiação UV penetra na parede celular dos microrganismos e é absorvida pelo DNA e RNA, materiais genéticos responsáveis pela biossíntese celular essencial a manutenção e desenvolvimento (METCALF e EDDY, 2016). A absorção de altas doses de UV pelas proteínas presentes nas membranas celulares

pode levar ao rompimento dessas membranas, resultando na morte da célula. Por outro lado, a absorção de pequenas doses de radiação UV pelo DNA pode apenas interromper a capacidade de reprodução do microrganismo, impedindo-o de contaminar o ambiente (DANIEL et al., 2001).

A Figura 5 ilustra o processo de dano ao material genético induzido pela radiação UV e o processo de reparo do material genético.

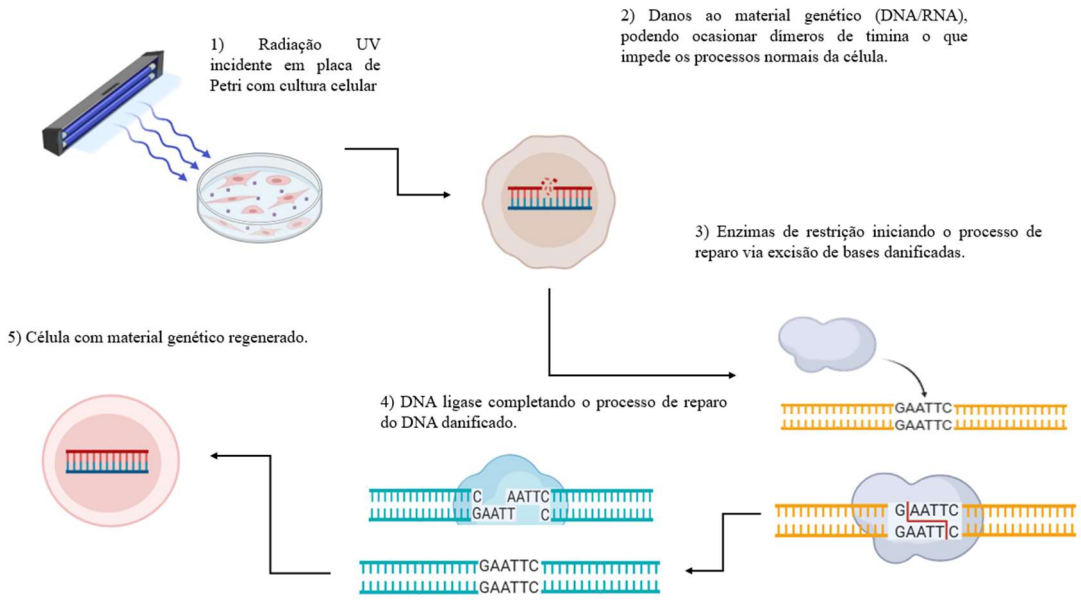


Figura 5 – Representação dos danos induzidos pela radiação UV e processo de reparo.

Os raios ultravioleta são rapidamente absorvidos por algumas moléculas presentes no DNA, como as bases púricas e pirimídicas, que se tornam mais reativas (DANIEL et al., 2001). Como mostrado na Figura 6, os nucleotídeos absorvem radiação UV em comprimento de onda que varia de 200 a 300 nm, com a absorção máxima de UV pelo DNA ocorrendo em 260 nm e absorção mínima em 230 nm (USEPA, 2006).

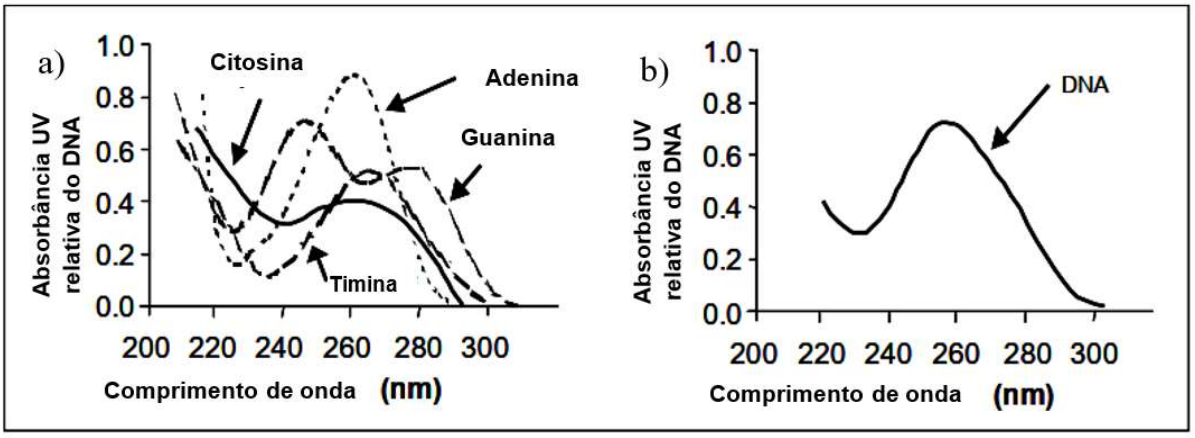


Figura 6 – a) Absorbância UV dos nucleotídeos e b) Absorbância UV do DNA.
Fonte: USEPA (2006)

De acordo com USEPA (2006), todas as purinas e pirimidinas absorvem fortemente a luz UV, mas a taxa de dano induzido pela radiação UV é maior nas pirimidinas. A absorção de luz UV pelas pirimidinas pode resultar em seis tipos de danos ao ácido nucleico, dependendo da dose de UV aplicada. Dentre esses, os três que mais contribuem para a inativação dos microrganismos são: 1) formação de dímeros de pirimidina (ciclobutano pirimidina – CPD) entre bases pirimídicas adjacentes na mesma fita de DNA ou RNA, sendo este o tipo mais comum; 2) fotoprodutos de pirimidina (6-4) pirimidona, que são semelhantes aos dímeros de pirimidina; e 3) ligações cruzadas entre proteínas e DNA, que ocorrem quando há ligações covalentes entre uma proteína e uma fita de DNA.

Segundo Sinha e Häder (2002), a formação de dímeros de pirimidina corresponde a aproximadamente 75% das lesões induzidas por UV nas células, enquanto os fotoprodutos representam cerca de 25%.

A absorção de radiação ultravioleta por bases nitrogenadas adjacentes pode resultar na formação de dímeros, como citosina-citosina, adenina-adenina e timina-timina. A timina, por ter uma estrutura mais simples entre as bases nitrogenadas, é a que apresenta maior tendência à formação de dímeros. Esses dímeros alteram a estrutura do DNA, impedindo a duplicação do DNA e consequente multiplicação celular, o que constitui o mecanismo fundamental da desinfecção UV(DANIEL et al., 2001). A Figura 7 ilustra o processo de dimerização do DNA quando exposto à radiação UV.

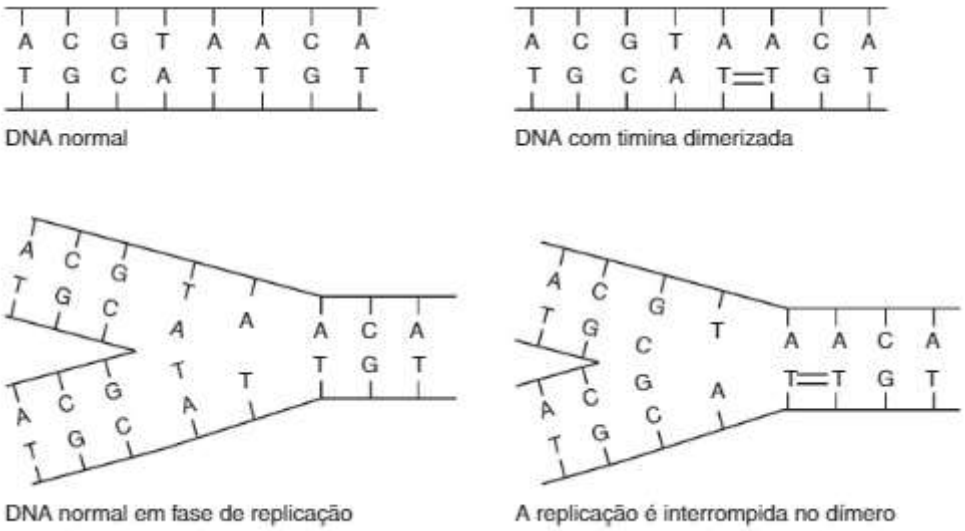


Figura 7 - Formação de dímeros de Timina no DNA após exposição à UV.
Fonte: Metcalf e Eddy (2016).

Devido à maior formação de dímeros de timina, supõe-se que microrganismos com DNA rico em timina sejam mais suscetíveis aos efeitos da radiação UV em comparação com organismos que possuem menor quantidade desse nucleotídeo em seu material genético.

Embora a formação de dímeros possa inibir a replicação de microrganismos, tornando-se letal para a célula, é importante ressaltar que doses inadequadas de UV podem não impedir completamente a replicação. Nesse caso, a replicação pode ocorrer com erros no código genético, resultando em mutações na nova célula. Além disso, uma dose insuficiente de radiação UV pode causar danos limitados ao DNA, que, em condições favoráveis, podem ser reparados por enzimas de reparo produzidas pela própria célula (USEPA, 1999).

Como alguns organismos são capazes de manter alguma atividade metabólica após serem expostos a radiação UV, eles podem ser capazes de reparar o dano causado durante a exposição. Muitos organismos na natureza, durante a sua evolução, desenvolveram mecanismos para reverter os danos causados pela radiação UV (METCALF e EDDY, 2016).

De acordo com Madigan *et al.* (2016) a maioria das células apresenta uma série de processos distintos para o reparo de DNA, seja para corrigir erros, seja para reparar danos. A maioria desses sistemas de reparo de DNA são livres de erros. Entretanto, alguns processos são propensos a erros, introduzindo mutações decorrentes do próprio processo de reparo. Os

processos de reparo do DNA podem ser agrupados em três categorias: reversão direta, reparo de dano em fita simples e reparo de dano em fita dupla.

Segundo Metcalf e Eddy (2016), em se tratando de desinfecção por UV, dois tipos de mecanismos estão envolvidos no processo de reversão: (1) fotorreativação (reversão direta) e (2) reparação no escuro (reparo de dano em fita simples).

Segundo Wright e Carins (1998), o mecanismo de reparação que é único da desinfecção UV é o de fotorreativação, onde a fotodimerização de timinas adjacentes resultantes da absorção de luz UV na região germicida pode ser revertida pela fotoliase com uso de energia no comprimento de onda entre 300 e 500 nm.

De acordo com os autores supracitados, os vírus não possuem mecanismo para reparação dos danos induzidos pela radiação UV. Entretanto, Metcalf e Eddy (2016) e USEPA (2006) complementam, que, embora as enzimas necessárias para a reparação não estejam presentes no DNA dos vírus, as enzimas das células hospedeiras podem ser utilizadas para o processo de reparação.

3.2.3 Eficiência germicida da radiação UV

Segundo Metcalf e Eddy (2016), a eficiência global de um processo de desinfecção por radiação UV é influenciada por diversos fatores, incluindo: (1) as características físico-químicas da matriz a ser irradiada, (2) a presença de partículas, (3) as características dos microrganismos presentes e (4) as características físicas do sistema de desinfecção.

De acordo com a USEPA (1999), as características das águas a serem tratadas incluem a vazão, a presença de sólidos suspensos e coloidais, a densidade bacteriana inicial e outros parâmetros físico-químicos. Tanto a concentração de sólidos suspensos totais quanto a concentração de microrganismos associados a partículas afetam a quantidade de radiação que atinge os organismos-alvo. Assim, quanto maiores essas concentrações, menor será a radiação UV absorvida pelos microrganismos.

Isso ocorre porque, segundo USEPA (2006), à medida que a luz UV se propaga da fonte, ela interage com os materiais ao longo do caminho, por meio de absorção, reflexão, refração e dispersão. Essa interação resulta em efeitos combinados entre a luz UV emitida e os componentes do reator UV, assim como com a água a ser tratada. Nos processos de tratamento

de água e efluentes, o impacto da absorção e dispersão pode ser avaliado por meio da medição da absorbância ou transmitância.

A absorção refere-se à transformação da luz em outras formas de energia ao passar por uma substância e varia conforme o comprimento de onda da luz. Os componentes presentes no reator e na água podem absorver a luz UV em graus diferentes, tornando-a, assim, indisponível para a desinfecção (USEPA, 2006).

A capacidade de absorção da água é um aspecto crucial no projeto de reatores UV. Águas com maior capacidade de absorção retêm mais luz UV, o que requer um maior consumo de energia para alcançar um nível equivalente de desinfecção. A absorbância é medida utilizando um espectrofotômetro, geralmente com uma amostra fixa de 1,0 cm de comprimento. Normalmente, a absorbância da água é avaliada a um comprimento de onda de 254 nm (HOWE et al, 2016).

De acordo com Metcalf e Eddy (2016), os constituintes presentes na matriz a ser tratada podem influenciar significativamente a intensidade média da radiação UV. Esse impacto é quantificado em termos de absorbância e transmitância. A redução da intensidade da radiação UV com a distância é descrita pela lei de Beer-Lambert, que estabelece que a absorbância de uma substância é proporcional à concentração do soluto e ao comprimento do caminho da radiação. (Equação 2):

$$\log\left(\frac{I}{I_o}\right) = \varepsilon(\lambda).C.x \qquad (2)$$

onde, I = intensidade da luz à distância x da fonte de luz, mW/cm²

I_o = intensidade da luz na fonte de luz, mW/cm²

ε (λ) = absortividade molar (também conhecida como coeficiente de extinção) do soluto que absorve luz de comprimento de onda λ, L/mol.cm

C = concentração do soluto que absorve luz, mol/L

x = comprimento do caminho ótico, cm

Quando o lado esquerdo da Equação é expresso como logaritmo natural, o lado direito da equação deve ser multiplicado por 2,303, porque o coeficiente de absorbância é definido na base 10. O termo do lado direito da equação é definido como absorbância, A (λ), que não possui unidades, mas que é frequentemente apresentado em unidades de cm^{-1}, que corresponde a

absortividade k (λ). Se o espaçamento de luz é de 1 cm, a absortividade é igual à absorbância (Equação 3):

$$k(\lambda) = e(\lambda).C = \frac{A(\lambda)}{x} \quad (3)$$

onde, k(λ) = a abosortividade, cm^{-1}

A (λ) = absorbância no coprimento de onda λ, sem dimensões

De acordo com Howe et al. (2016), na aplicação de radiação UV para a inativação de microrganismos, a transmitância é um parâmetro crucial que reflete a quantidade de radiação UV capaz de passar através de um determinado comprimento de caminho em um comprimento de onda específico. Esse parâmetro é utilizado na concepção de sistemas de monitoramento UV em relação à qualidade da água. A transmitância de uma solução é definida pela seguinte equação (Equação 4):

$$T = \left(\frac{I}{I_o}\right).100 \quad (4)$$

onde, T = transmitância, %

I = intensidade da luz à distância x da fonte de luz, mW/cm^2

I_o = intensidade da luz na fonte de luz, mW/cm^2

A transmitância a um dado comprimento de onda também pode ser obtida das medições de absorbância, utilizando a seguinte relação (Equação 5):

$$T = 10^{-A(\lambda)} \quad (5)$$

onde, T = transmitância a um comprimento de onda λ

A=absorbância no comprimento de onda λ

Assim, para uma solução perfeitamente transparente A(λ) = 0, T = 1, e para uma solução perfeitamente opaca A (λ) → ∞, T = 0. O termo percentagem de transmitância comumente utilizado na literatura é (Equação 6):

$$UVT_{254} = 10^{-A_{254}}.100 \quad (6)$$

onde, UVT_{254}=transmitância a um comprimento de onda de 254 nm

A_{254} = absorbância a um comprimento de onda de 254 nm

A Tabela 2 apresenta os valores típicos de absorbância e transmitância para várias águas.

Tipos de águas residuais	Absorção UV254, a.u[1]./cm³	Transmitância UVT254, %
Águas subterrâneas	0,0706 – 0,0088	85 -98
Águas superficiais, sem tratamento	0,3010 – 0,0269	50 – 94
Água de superfície, após a coagulação, floculação e sedimentação	0,0969 – 0,0132	80 – 97
Água de superfície após a coagulação, floculação, sedimentação e filtração	0,0706 – 0,0088	85 – 98
Água de superfície após a microfiltração	0,0706 – 0,0088	85 – 98
Água de superfície após osmose inversa	0,0458 – 0,0044	90 – 99

[1] a.u. = unidade de absorbância

Tabela 2 – Valores típicos de absorbância e transmitância para várias águas. Fonte: Howe et. al. (2016).

Segundo Metcalf e Eddy (2016), os constituintes dissolvidos impactam a desinfecção por radiação UV de duas maneiras: diretamente, por meio da absorbância (onde um aumento na absorbância reduz a intensidade da radiação UV), e indiretamente, ao provocar depósitos nos tubos de quartzo, o que também diminui a intensidade da radiação no meio líquido. Entre os compostos inorgânicos que afetam a transmitância, o ferro é o mais relevante, pois sua forma dissolvida absorve radiação UV. Além disso, compostos orgânicos com duplas ligações e grupos funcionais aromáticos também têm a capacidade de absorver essa radiação. O Quadro 3 descreve os principais constituintes físico-químicos e sua influência na desinfecção UV.

Se sais de ferro forem utilizados no processo de tratamento, é fundamental avaliar os benefícios econômicos da mudança para outro agente de coagulação. Essa análise deve determinar se a economia gerada pela instalação de um sistema de desinfecção UV é superior ou inferior aos custos de instalação e operação associados ao novo produto químico (METCALF e EDDY, 2016).

Em relação aos fenômenos de refração, reflexão e dispersão, USEPA (2006) destaca que, ao contrário da absorção, esses fenômenos alteram a direção da luz UV, mas não a tornam indisponível para a inativação dos microrganismos.

Quadro 3 – Principais constituintes físico-químicos e sua influência sobre a desinfecção UV.

Constituinte	Efeito
DBO, DQO, COT, etc	Sem efeito ou com efeito limitado, a menos que as substâncias húmicas constituam a maior parte da DBO
MON (matéria orgânica natural)	Tem alta capacidade de absorver a radiação UV
Óleos e graxas	Pode acumular sobre os tubos de quartzo das lâmpadas UV, pode absorver a radiação UV
SST	Absorve radiação UV, pode proteger as bactérias associadas
Alcalinidade	Pode ter impacto no potencial de incrustação. Também afeta a solubilidade de metais que podem absorver radiação UV
Dureza	Cálcio, magnésio e outros sais podem formar depósitos minerais sobre os tubos de quartzo, especial ente em temperaturas elevadas
Amônia	Sem efeito ou com efeito limitado
Nitrito	Sem efeito ou com efeito limitado
Nitrato	Sem efeito ou com efeito limitado
Ferro	Tem alta capacidade de absorver radiação UV, pode precipitar sobre os tubos de quartzo, ser aprisionado nos sólidos em suspensão e proteger as bactérias por absorção
Manganês	Tem alta capacidade de absorver radiação UV
pH	Pode afetar a solubilidade de metais e carbonato
SDT	Pode aumentar o potencial de incrustação e formação de depósitos minerais nos tubos de quartzo
Descargas industriais	Dependendo dos constituintes (corantes), pode resultar em variações diárias ou sazonais na transmitância do efluente
Drenagem urbana	Dependendo dos constituintes, pode conduzir a variações de curta duração, ou sazonais, na transmitância do efluente

Fonte: Metcalf e Eddy (2016)

Segundo Howe et al (2016), o material particulado pode interferir na transmissão da luz UV por meio de dois mecanismos importantes: sombreamento e revestimento. As partículas podem sombrear os organismos-alvo da luz UV através dos fenômenos de refração, reflexão e dispersão (espalhamento). No entanto, os autores ressaltam que, em sistemas que utilizam filtração, esses efeitos tendem a ser menos significativos. Por outro lado, no tratamento de água não filtrada para abastecimento e em efluentes de águas residuais não filtradas, essas

interferências podem ser substanciais. A Figura 8 ilustra os mecanismos de interferência na desinfecção UV por partículas.

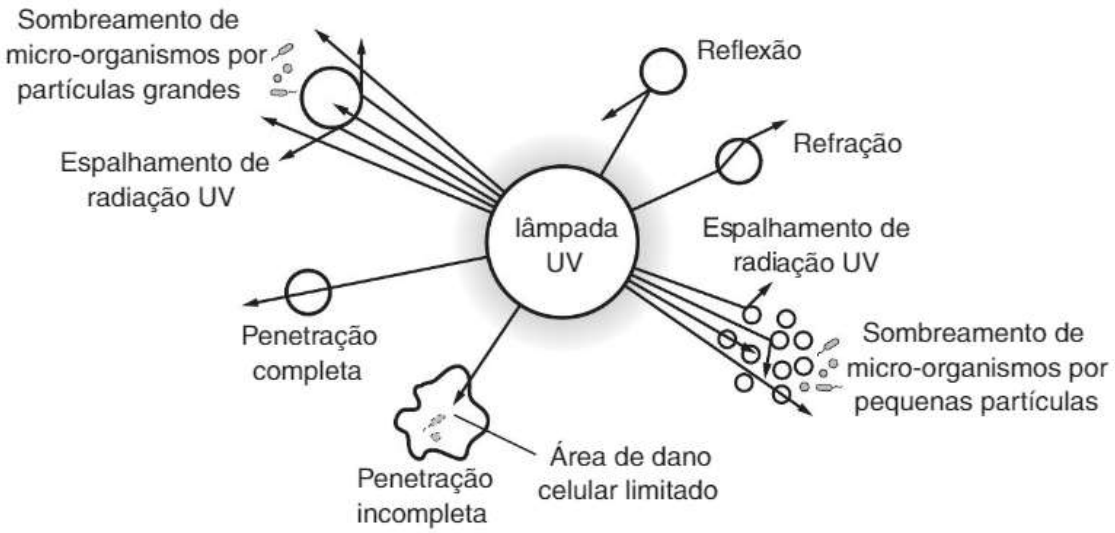


Figura 8 – Ilustração dos mecanismos de interferência na desinfecção UV por partículas.
Fonte: Metcalf e Eddy (2016)

Muitos microrganismos de interesse, como bactérias do grupo coliforme, podem estar presentes no meio líquido a ser tratado de forma dispersa e/ou associadas a outras partículas. Essas bactérias são particularmente relevantes, pois servem como indicadores no controle das emissões de efluentes e na avaliação da qualidade da água potável. A importância dos coliformes reside no fato de que sua presença indica a possível presença de outros organismos patogênicos. Assim, a inativação de coliformes está diretamente associada à inativação desses organismos patogênicos (METCALF E EDDY, 2016).

A eficiência do processo de desinfecção por radiação UV também depende das características dos microrganismos. Segundo USEPA (2006), variações na composição do DNA fazem com que os microrganismos absorvam a luz UV de maneiras diferentes, contribuindo, assim, para as variações na suscetibilidade de cada microrganismo à desinfecção por UV. Entre os patógenos de interesse na água potável, os vírus são os mais resistentes à desinfecção por UV, seguidos pelas bactérias formadoras de esporos e pelos oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*. A maior resistência dos oocistos e cistos pode estar relacionada a fatores como a quiescência no ambiente e desidratação o que faz pode levar a maior tolerância ao estresse ambiental. A Figura 9 demonstra o espectro de absorção de três microrganismos distintos.

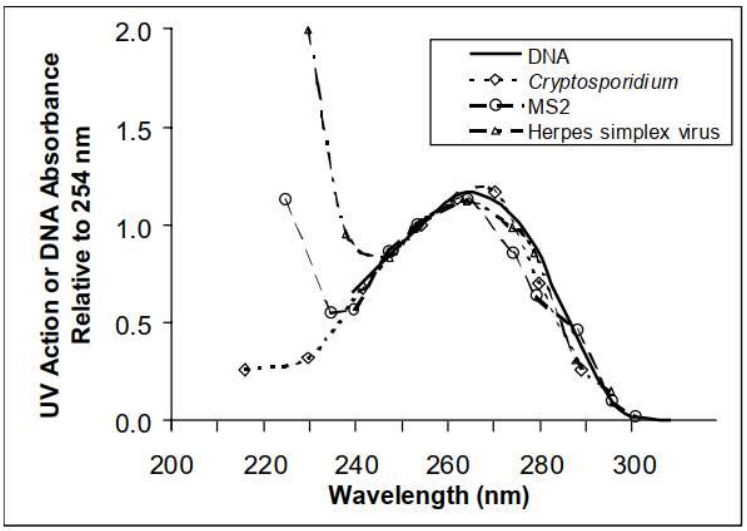


Figura 9 – Comparação da absorção de UV em 254 nm para diferentes microrganismos e DNA. Fonte: USEPA (2006)

De acordo com Howe et al. (2016), os sistemas de desinfecção UV, especialmente os de média pressão, apresentam tempos totais de residência significativamente mais curtos do que outros tipos de sistemas de desinfecção. Nesse contexto, os problemas de curto-circuito e dispersão são desafiadores e devem ser cuidadosamente considerados no projeto. Para garantir um bom desempenho desses sistemas, é fundamental valorizar os fatores que influenciam a dispersão e os curtos-circuitos, mais do que o que é necessário na concepção da maioria dos outros sistemas de desinfecção.

Os desafios no dimensionamento de reatores UV estão relacionados a: (1) a imprecisão no conhecimento da intensidade média da radiação UV e (2) o tempo de exposição que todos os organismos patogênicos experimentam ao passar por um sistema de desinfecção UV. Na prática, os sistemas de desinfecção apresentam variações internas tanto no perfil de intensidade da radiação UV quanto na distribuição do tempo de exposição. O perfil interno da intensidade da radiação UV resulta do posicionamento não homogêneo das lâmpadas UV no reator, da falta de uma mistura radial ideal, além dos efeitos de reflexão e absorção de radiação pelo material particulado e pela absorbância dos constituintes presentes na matriz. Por outro lado, a distribuição do tempo de exposição é influenciada por condições hidráulicas não uniformes, levando a uma mistura longitudinal (METCALF E EDDY, 2016).

Para que um sistema de desinfecção UV opere de forma eficiente, é essencial estudar inicialmente os fatores intervenientes no processo em escala de laboratório. Isso envolve a aplicação dos conhecimentos sobre cinética de desinfecção por UV e a realização de testes para

avaliar a inativação de microrganismos pela radiação. A partir desses estudos, é possível determinar os parâmetros de projeto fundamentais: (1) dose de UV, (2) intensidade e (3) tempo de exposição.

3.2.4 Cinética de desinfecção por UV e metodologia de desenvolvimento de curva-resposta

O primeiro passo para avaliar o desempenho de um sistema de desinfecção por radiação UV é determinar a dose necessária para inativar o microrganismo mais crítico, a fim de atender aos limites especificados para a proteção da saúde pública, no caso de consumo ou reuso. Três métodos, de modo geral, têm sido utilizados para estimar a dose de radiação UV. No primeiro método, a dose média de radiação UV é calculada com base em uma intensidade média de radiação emitida e no tempo de exposição. A intensidade média de radiação UV pode ser estimada utilizando um método de cálculo conhecido como soma das fontes pontuais (SFP). No passado, esse método era utilizado com menos frequência pelos projetistas, pois não considerava as características hidráulicas específicas de cada sistema, assumindo um comportamento hidráulico ideal que raramente se verifica em instalações reais. Atualmente, o uso desse método para determinar a dose de radiação UV não é recomendado (METCALF e EDDY, 2016).

Ainda de acordo com os autores mencionados, o segundo método envolve a utilização de modelagem de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para integrar a distribuição de intensidade da radiação UV e o perfil de velocidade dentro do reator, a fim de obter a distribuição da dose de radiação UV no sistema. Embora o uso do método CFD seja promissor, sua aplicação tem sido limitada devido a alguns fatores: (1) a metodologia não é padronizada; (2) as abordagens atualmente utilizadas não conseguem prever a eficiência do processo de desinfecção de maneira adequada; e (3) mesmo que a previsão da distribuição das doses de radiação UV seja precisa, sua aplicação para a especificação de sistemas de desinfecção por radiação UV apresenta problemas.

O terceiro método, que é o mais amplamente utilizado, consiste na obtenção da dose de radiação UV por meio de um bioensaio com feixe de radiação colimado.

Segundo Howe et al. (2016), a eficácia da desinfecção por UV depende da dose de UV à qual os microrganismos estão expostos. Conforme a USEPA (2006), a dose de UV é calculada como a integral da intensidade de UV durante o tempo de exposição. Quando a intensidade de UV se

mantém constante ao longo desse período, a dose de UV pode ser expressa como o produto da intensidade e do tempo de exposição (Equação 7). As unidades comumente utilizadas para medir a dose de UV incluem joules por metro quadrado (J/m²), milijoules por centímetro quadrado (mJ/cm²) e miliwatts-segundo por centímetro quadrado (mWs/cm²).

$D = I_m \times t$ (7)

onde, D = dose de radiação UV, mJ/cm² (mJ/cm² = mW.s/cm²)

I_m = intensidade média de radiação UV, mW/cm²

t = tempo de exposição, s

De acordo com USEPA (2006), a intensidade UV média é calculada a partir da intensidade UV medida na superfície do meio contendo a suspensão microbiana, a profundidade da suspensão e a absorbância da água.

O método mais comum para determinar a dose de UV necessária para a inativação de microrganismos envolve a exposição de uma amostra de água bem misturada em um pequeno reator de batelada, como uma placa de Petri, a um feixe colimado de luz UV com intensidade conhecida, durante um período específico (HOWE et al. 2016). A Figura 10 ilustra o esquema do aparelho utilizado e o feixe colimado.

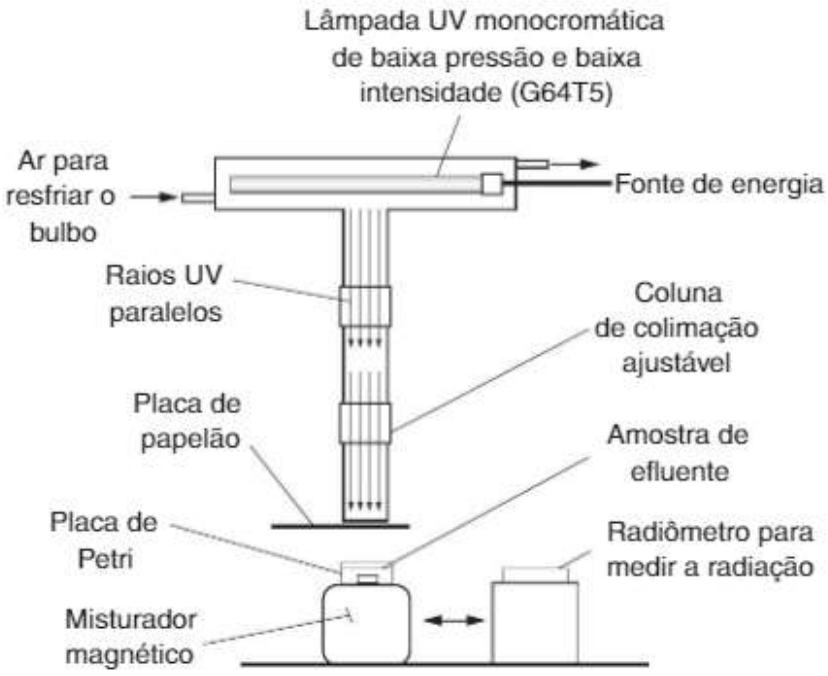


Figura 10 – Esquema básico de aparato de feixe colimado usado para obter a curva de dose-resposta. Fonte: Howe et al. (2016).

Segundo Howe et al. (2016), a utilização de uma lâmpada monocromática de baixa pressão e baixa intensidade no aparelho de feixe colimado permite caracterizar com precisão a intensidade da radiação UV aplicada. O uso de um reator de batelada possibilita determinar de forma precisa o tempo de exposição. A dose de UV aplicada pode ser controlada por meio da variação da intensidade da radiação UV ou do tempo de exposição. Como a geometria é fixa, a intensidade de UV em média profundidade dentro da amostra da placa de Petri pode ser calculada pela Equação 8.

$$D_m = I_s.t.(1 - R).P_f.\left[\frac{(1 - e^{-2,303.k_{254}.d})}{2,303.(k_{254}.d)}\right].\left(\frac{L}{L+d}\right) \quad (8)$$

onde, D_m = dose média UV, mW/cm²

I_s= intensidade média de radiação UV sobre a superfície da amostra antes e depois da irradiação, mW/cm²

t= tempo de exposição, s

R = reflexão de radiação a 254 nm na interface ar-água

P_f = fator da placa de Petri

k_{254} = absorbância da amostra, u.a/cm (base 10)

d = profundidade da amostra, cm

L = distância da linha de centro da lâmpada até a superfície do líquido, cm

De acordo com os autores mencionados, o termo (1 – R) considera a reflexão da radiação na interface ar-água, sendo que o valor de R é aproximadamente 2,5 %. O termo P_f, geralmente superior a 0,9, é utilizado para levar em conta que a distribuição da radiação UV não é uniforme em toda a superfície da placa. O termo entre colchetes representa a intensidade média de radiação UV na placa de Petri, conforme a lei de Beer-Lambert. Por fim, o último termo é o fator de correção referente à altura da fonte de radiação UV acima da amostra.

A análise do grau de inativação dos microrganismos alcançada com a aplicação de uma determinada dose de radiação UV é comumente estudada pela cinética de desinfecção. Em um gráfico, a taxa de sobrevivência da cultura testada (geralmente expressa em log de inativação) é plotada no eixo das ordenadas, enquanto a variação das doses de UV aplicadas é representada no eixo das abscissas.

Segundo a USEPA (1986), a cinética de desinfecção por UV segue um modelo de pseudoprimeira ordem, baseado na lei de Chick. Howe et al. (2016) explicam que, no início do

século XX, a Dra. Harriet Chick, assistente de pesquisa no Instituto Lister de Medicina Preventiva em Chelsea, Inglaterra, propôs que a desinfecção poderia ser modelada como uma reação de primeira ordem em relação à concentração dos organismos. Chick demonstrou seu conceito ao traçar a concentração de organismos viáveis em função do tempo em um gráfico semilogarítmico, utilizando dados de desinfecção para uma ampla variedade de desinfetantes (como fenol, cloreto de mercúrio e nitrato de prata) e organismos (incluindo *Salmonella typhi, Salmonella paratyphi, E. coli, Staphylococcus, Yersinia pestis* e *Bacillus anthracis*). Desde então, a "lei de Chick" tem sido amplamente aplicada aos dados de desinfecção. A Equação 9 apresenta a lei de Chick.

$$r = -k.N \quad (9)$$

onde, r = taxa da reação para diminuição em organismos viáveis com o tempo, org/L.min;
k = constante de taxa da lei de Chick, min-¹;
N = concentração de organismo, org/L.

Na forma diferencial a Equação 9 pode ser descrita como a Equação 10

$$\frac{dN}{dt} = -k.\ N_t \quad (10)$$

onde, $^{dN}/_{dt}$ = taxa de variação da concentração de organismo com o tempo;
k = constante de inativação, T-¹;
N_t = número de organismo no tempo t;
t = tempo de contato

Para t = 0 e N = N_0, a Equação 10 pode ser integrada na forma da Equação 11, 12 ou 13

$$\ln\frac{N_t}{N_0} = -k.t \quad (11)$$

ou

$$N_t = N_0.e^{-k.t} \quad (12)$$

ou

$$t = \frac{2{,}303}{k}.\log\frac{N_0}{N_t} \quad (13)$$

De acordo com Metcalf e Eddy (2016), o valor da constante de inativação (k) pode ser obtido a partir da construção de um gráfico de - $\ln N_t/N_0$ em função do tempo (t), onde k é a inclinação da reta resultante do melhor ajuste. Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017), as equações 11, 12 e 13 são válidas para as seguintes condições: i) população homogênea de microrganismos (cultura pura); ii) escoamento do tipo pistão ou batelada de mistura completa; iii) distribuição homogênea de desinfetante ao longo do tempo; e iv) k é válida somente para uma determinada concentração residual do desinfetante.

Embora a lei de Chick tenha ampla aplicabilidade, um efeito importante não considerado no modelo é a concentração do desinfetante. Frequentemente, diferentes concentrações de desinfetante resultam em diferentes taxas de diminuição dos organismos viáveis, exigindo um método mais adequado para contabilizar a concentração do desinfetante. No mesmo ano em que a Dra. Chick propôs seu modelo, Hebert Watson sugeriu que o tempo necessário para alcançar um determinado nível de desinfecção estava relacionado à concentração do desinfetante (HOWE et al, 2016). A Equação 14 descreve essa relação proposta por Watson.

$$K = \Lambda.C^n \qquad (14)$$

onde, K = constante de inativação, T^{-1}, base e;

Λ = coeficiente de letalidade específica, as unidades variam em função de n;

C = concentração do agente de desinfecção, mg/L;

n = constante empírica relacionada à diluição, adimensional

De acordo com Metcalf e Eddy (2016), as interpretações oferecidas para os possíveis valores da constante de diluição, n, são: 1) n = 1, a concentração e o tempo de contanto têm a mesma importância para o processo de desinfecção; 2) n>1, a concentração é mais importante que o tempo de contato; e 3) n<1, o tempo de contato é mais importante que a concentração. O valor de n pode ser obtido construindo-se um gráfico da concentração C em função do tempo t, em escala dilog para uma dada eficiência de inativação. Howe et al. (2016) observam que, em tais gráficos, o coeficiente de diluição é geralmente encontrado em torno de 1. Quando o coeficiente de diluição é igual 1, isso indica que a concentração e o tempo de desinfecção são igualmente importantes para a inativação dos microrganismos.

Considerando as equações de Chick e Watson como sendo complementares, a combinação das expressões na forma diferencial resulta na equação 15, conhecida como "modelo de Chick e Watson".

$$\frac{dN_t}{dt} = -\Lambda.C^n.N_t \quad (15)$$

Integrando a equação 15 para t = 0 e N = N_0, o modelo pode ser escrito na forma das equações 16, 17, 18 e 19.

$$\ln\frac{N_t}{N_0} = -\Lambda.C^n.t \quad (16)$$

ou

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\Lambda.C^n t} \quad (17)$$

ou

$$\log\frac{N_t}{N_0} = -\Lambda.C^n.t \quad (18)$$

ou

$$\frac{N_t}{N_0} = 10^{-\Lambda.C^n t} \quad (19)$$

Considerando n igual a unidade, e relacionando o conceito de C.t como Dose, a equação 19 pode ser escrita na forma a equação 20.

$$\frac{N_t}{N_0} = 10^{-\Lambda.C.t} = \frac{N_t}{N_0} = 10^{-\Lambda.D} \quad (20)$$

onde, C = concentração residual do desinfetante, mg/L;

t = tempo de contato no reator, minutos; e

D = dose de desinfecção para um valor específico de inativação, mg.min/L

Segundo Metcalf e Eddy (2016), para avaliar a eficiência de inativação que pode ser alcançada com uma determinada dose de radiação UV, a concentração de microrganismos é medida antes e depois da exposição ao feixe colimado. A inativação dos microrganismos é avaliada por meio de métodos como a determinação do número mais provável (NMP) ou o teste de filtração em membrana para bactérias, contagem em placas para vírus ou o teste de infectividade em animais para protozoários. Para garantir a precisão dos testes de dose-resposta realizados em laboratório

com feixe colimado, é fundamental repetir os experimentos, a fim de obter resultados estatisticamente significativos.

A eficiência da desinfecção UV, testada em aparatos de feixe colimado, supondo I constante e variando o tempo de aplicação, pode ser escrita na forma da Equação 21.

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-k.I.t} \quad (21)$$

onde, N_t = número de microrganismo no tempo t;

N_0 = número inicial de microrganismo;

t = tempo de exposição (s);

k = coeficiente de inativação ($cm^2/\mu M.s$); e

I = intensidade da radiação($\mu M/cm^2$)

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017), a Equação 21 só tem sido aplicada nas situações em que se pode considerar desprezível a matéria suspensa, a população de microrganismo for homogênea e uma única lesão causada pela radiação UV na célula for suficiente para inativar o microrganismos considerado. Quando tais condições não forem obedecidas deve-se considerar uma diminuição da eficiência de inativação do microrganismo. Os resultados obtidos de um bioensaio com feixe colimado são apresentados na forma de uma curva de dose resposta, como exemplificado na Figura 11

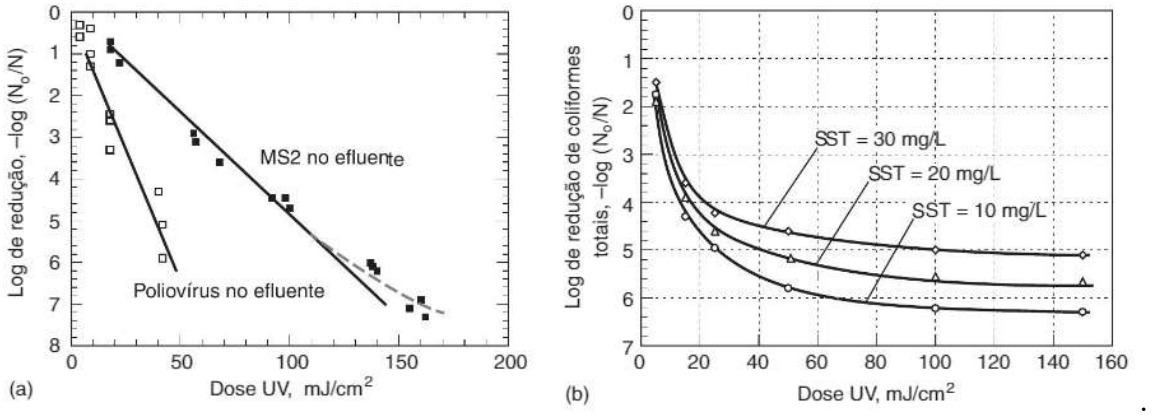


Figura 11 – Curvas de dose respostas típicas para desinfecção UV: a) curva para *MS2* e Poliovírus, e b) curva para coliformes totais para efluentes com concentrações de sólidos suspensos totais variadas. Fonte: Metcalf e Eddy (2016).

Germetec (2003), Hijnen *et al.* (2006) e Bolton e Cotton (2008), apud Di Bernado, Dantas e Voltan(2017) apresentam informações sobre doses para vários microrganismos visando eficiências de 90 a 100 % de inativação. Essas informações são apresentadas nas Figuras 16 a

19, onde na Tabela 3 são apresentadas as dosagens necessárias para eficiência de desinfecção de 90 % de alguns microrganismos e superfícies.

Já a Tabela 4 mostra as dosagens requeridas para a inativação de 99,99% (4 logs) de alguns microrganismos patogênicos, considerando a fotorreativação, conforme recomendação da EPA (2006). Na Tabela 5, são apresentadas as dosagens necessárias para alcançar uma eficiência de desinfecção de 90% a 100% para vários microrganismos. Por fim, a Tabela 6 apresenta a sensibilidade de diversos microrganismos à radiação UV emitida por lâmpadas monocromáticas e policromáticas, com base em testes realizados com um aparato de feixe colimado.

Tabela 3 – Dosagens de radiação para eficiência de inativação de 90%. Fonte: Di Bernado, Dantas e Voltan (2017).

Atividade de desinfecção	Dosagem de radiação UV (mW.s/cm²)
Ar	25
Água para consumo em geral	30
Água desonizada ou após sistema de osmose reversa	90
Redução de carbono orgânico total	90 a 120
Inativação de *E. coli*	1 a 3
Inativação de *Leptospira ssp.*	3
Inativação de *Streptococus pyrogenes*	2 a 3
Inativação de vírus da hepatite B	3 a 11
Inativação de *Legionella pneumophila*	2 a 5
Inativação de *Salmonella typhosa*	1 a 6
Inativação de vírus da influenza	2 a 4

Tabela 4 – Dosagem para inativação de 4 log de bactérias com e sem fotorreativação. Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

Espécie de bactéria	Dosagem de UV (mJ/cm²)	
	Sem fotorreativação	Com fotorreativação
E. coli ATCC 11229	10	28
E. coli O157:H17	6	25
Enterobacter cloacae	10	33
Pseudomonas aeruginosa	11	19
Salmonella marcescens	13	30
Shigella dysenteriae ATTC 29027	3	------
Shigella sonnei ATTC 9290	8,2	------
Staphylococus aureus	10,4	------

Tabela 5 – Dosagens para eficiência de inativação de 90 % ou 100%. Fonte: Di Bernado, Dantas e Voltan (2017).

Microrganismo	**Dosagem necessária (µW.s/cm²) – 253,7 nm**	
	Inativação de 90%	**Inativação de 100 %**
	Bactéria	
Bacillus paratyphosus	3.200	6.100
Clostridium testani	12.000	22.000
Coynebacterium diphiteriae	3.400	6.500
Eberthella typhosa	2.100	4.100
E. coli	3.000	6.600
Legionella pneumophila	380	2.760
Microbacterium tuberculosis	5.400	10.000
Pseudomonas aeruginosa	5.500	10.500
Pseudomonas fluorescens	3.500	8.600
Salmonella enteritides	4.000	7.600
Salmonella typhimurium	8.000	15.200
Sarcina sutea	17.900	26.400
Shihella paradysenteriae	1.700	3.400
Staphilococus aureus	4.950	6.600
Streptococus viridans	2.000	3.800
	Vírus	
Bacteriófago da *E. coli*	3.600	6.600
Influenza	3.600	6.600
Poliovírus 1	28.000	42.000 (inativação de 99,9%)
	Protozoários	
Giardia *lamblia*	63.000	----------
Paramecium	110.000	220.000
	Nematódeo	
ovo	51.000	92.000
Fungos	24.000	45.000

Tabela 6 – Sensitividade de microrganismos à radiação UV monocromática (MC) e policromática (PC). Fonte: Adaptado de Di Bernado, Dantas e Voltan (2017

Microrganismo	Dosagem da radiação UV (mJ/cm²)	Fonte UV
Vírus		
Poliovírus tipo 1	50 a 150	Monocromática
Adenovírus ST2, 14, 40, 41	8 a 306	Monocromática
Adenovírus ST40	8 a 184	Monocromática
Adenovírus ST2, 41	30 a 90	Policromática
Rotavírus SA-11	5 a 50	Monocromática
Rotavírus SA-11	5 a 30	Policromática
Hepatite A	5 a 28	Monocromática
Coxsackie vírus B5	5 a 40	Monocromática
Bacteriófagos		
MS2 – fagos	5 a 139	Monocromática
MS2 – fagos	12 a 46	Policromática
PRD1	9 a 35	Monocromática
B40-8	1 a 39	Monocromática
T7	5 a 20	Monocromática
Bactérias		
Salmonella typhi	2 a 10	Monocromática
Yersinia enterocolitica	0,6 a 5	Monocromática
Shigella dysenteriae	1 a 5	Monocromática
Shigella sonnei	3 a 8	Monocromática
Vibrio cholenae	0,6 a 4	Monocromática
Legionella pneumophila	0,5 a 12	Monocromática
Eschirichia coli	1 a 15	Monocromática
Streptococcus faecalis	2,5 a 16	Monocromática
Clostridium perfringens	48 a 64	Policromática
Protozoários e *Acanthamoeba ssp.*		
Cryptosporidium parvum	0,5 a 6,1	Policromática
Cryptosporidium parvum	0,9 a 13,1	Monocromática
Giardia muris	1,5 a 11	Monocromática
Giardia lamblia	0,05 a 1,5	Monocromática
Acanthamoeba ssp.	43 a 172	Monocromática

3.2.5 Vantagens e Desvantagens da radiação UV

De acordo com (US EPA, 2020) e Bolton e Cotton (2008), a desinfecção de água por radiação UV, em relação ao uso de desinfetantes químicos, apresenta as seguintes vantagens:

- A desinfecção por UV é efetiva para inativação da maioria dos vírus, esporos e cistos;

- A desinfecção por UV é um processo físico e não químico, que elimina a necessidade de gerar, manipular, transportar ou armazenar produtos químicos tóxicos/perigosos ou corrosivos;
- Não há produção de residual que possa ser prejudicial a vida humana ou aquática;
- Desinfecção por UV possui um baixo tempo de contato quando comparado com outros desinfetantes (aproximadamente 20 a 30 segundos com lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio);
- Equipamentos de desinfecção por UV demandam menor área para implantação quando comparado com outros métodos;
- É uma tecnologia de desinfecção muito eficaz para *Cryptosporudium* e *Giardia*;
- Não altera significativamente a qualidade da água, isto é, nenhuma mudança para os parâmetros Carbono Orgânico Total (COT), pH, corrosividade, potencial de formação de subprodutos da desinfecção ou turbidez;
- A tecnologia é relativamente barata, com baixos custos operacionais e de capital, em comparação com outras opções de desinfecção para protozoários;
- É relativamente fácil de operar (ou seja, ativar ou desativar) o equipamento é baseado nas mudanças de vazão de água, qualidade da água e etc.;
- O equipamento de radiação UV é relativamente pequeno e usualmente adaptável às instalações de tratamento de água existentes;
- Não são necessários produtos químicos para desinfecção UV; e
- A desinfecção é muito rápida. Os tempos de contato estão no intervalo de alguns segundos.

No entanto, segundo (US EPA, 2020) e Bolton e Cotton (2008), a técnica de desinfecção por UV apresenta as seguintes desvantagens:

- Baixas dosagens podem não ser efetivas para a inativação de alguns vírus, esporos e cistos;

- Organismos podem as vezes reparar e reverter os efeitos destrutivos da UV através de um “mecanismo de reparo”, conhecido como fotorreativação, ou na ausência de luz conhecido como reparo no escuro;
- Um programa preventivo de manutenção torna-se necessário para controlar a incrustação nos tubos;
- Turbidez e Sólidos Suspenso Totais (SST) podem tornar a desinfecção por UV ineficaz. Desinfecção por UV com lâmpadas de baixa pressão é ineficaz para efluentes com concentração de SST acima de 30 mg/L;
- A desinfecção por UV não é tão econômica quanto a cloração, mas os custos são competitivos quando a cloração é usada;
- Não existe formação de residual na desinfecção. Portanto, algum nível de cloro ou cloraminas são geralmente utilizadas para manter um residual de desinfecção no sistema de distribuição;
- No momento, não é possível monitorar continuamente a dose de UV, portanto, os operadores dependem de medições secundárias (leituras do sensor, transmitância de UV, vazão de água etc.);
- A maioria dos reatores UV contém lâmpadas de mercúrio, portanto a quebra das lâmpadas de UV representa um possível risco de contaminação por mercúrio;
- O fornecimento de energia elétrica pela concessionária pode estar sujeito a interrupções, o que pode causar o não funcionamento das lâmpadas UV por períodos de 1 a 5 minutos. Isso pode resultar no não tratamento da água, a menos que a água seja desviada para descarte ou início do processo de tratamento; e
- Há momentos em que a água pode ser subdesinfetada devido a interrupções de energia ou aquecimento da lâmpada.

3.3 Tecnologia Diodo de Emissão de Luz Ultravioleta (LED–UVC) Aplicada À Desinfecção de Água

Em instalações convencionais de UVC, a energia germicida é usualmente gerada a partir de lâmpadas de mercúrio de baixa pressão (monocromática) ou média pressão (policromática). Esses sistemas possuem características operacionais importantes, como: o consumo de energia varia de 40-500 watts (W) para lâmpadas de baixa pressão e de 1000 a 13000 W para lâmpadas de média pressão, a intensidade germicida varia de 30-50% nas lâmpadas de baixa pressão e de 15 a 20 % nas lâmpadas de média pressão e a vida útil das lâmpadas varia de 8000 a 15000 horas para as de baixa pressão e de 3000 a 8000 para as de média pressão (METCALF; EDDY, 2016).

Além do alto consumo de energia e da vida útil relativamente curta, os sistemas tradicionais de UVC apresentam outras desvantagens, como a alta fragilidade do tubo de quartzo e o risco de liberação de mercúrio, um componente tóxico e perigoso para o meio ambiente. O descarte correto dessas lâmpadas é essencial, mas pode aumentar os custos devido à necessidade de procedimentos adequados de disposição (CHEN; LOEB e KIM, 2017; SONG; MOHSENI e TAGHIPOUR, 2016). Além disso, existe uma tendência mundial de redução ou controle estrito do uso de mercúrio (OGUMA, 2018). De acordo com Chen, Loeb e Kim (2017), essas desvantagens se aplicam tanto a instalações residenciais quanto a estações municipais de tratamento de água em grande e pequena escala, destacando a necessidade de pesquisa e desenvolvimento contínuo na área de inativação por UVC, com foco em tecnologias mais sustentáveis.

Segundo Song, Mohseni e Taghipour (2016), nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento e aprimoramento da indústria de semicondutores, os Diodos Emissores de Luz UVC (LEDs-UVC) surgiram como uma nova fonte de geração de radiação. Os LEDs são dispositivos que utilizam materiais semicondutores para emitir radiação UVC pela excitação de elétrons, com o comprimento de onda resultante dependendo do material semicondutor usado na fabricação. Chen, Loeb e Kim (2017) complementam que, com o desenvolvimento acelerado e as reduções de custo recentes dos LEDs-UVC, pesquisadores e profissionais da indústria nos setores de desinfecção de água e esgoto estão cada vez mais encorajados a considerar os LEDs-UVC como uma fonte alternativa de radiação, com potencial para causar uma grande revolução no campo da desinfecção de água e efluentes

Quadro 4 – Principais Vantagens e Desvantagens dos LEDs-UV. Fonte: Adaptado de CHEN, LOEB e KIM, (2017)

Característica	Lâmpadas convencionais de UV	LED-UV	Vantagens em relação as lâmpadas convencionais de UV
Mercúrio	20 – 200 mg	Não contém	Livre de mercúrio
Tempo de aquecimento para temperatura de trabalho	2 – 15 min	Instantâneo	Fluxo intermitente, possibilidade de uso como luz pulsante
Tamanho	20 mm (diâmetro) x 120 mm (comprimento)	≈ 1 mm²	Fácil integração
Temperatura da superfície (em operação)	Lâmpada policromática (≈ 600 ºC) Lâmpada monocromática de alta intensidade (≈ 100 ºC)	Igual da água de tratamento	Não promove incrustação
Material de construção	Tubos de quartzo	Metal ou cerâmica	Maior durabilidade e menor fragilidade
Arquitetura	Tubos cilíndricos	Retangular, circular, com inserção pontual	Fácil integração e versatilidade ao sistema de tratamento
Comprimento de onda	Policromático (200 – 300 nm) Monocromático (95% da emissão em 250 nm)	Monocromático; disponível para uso em diferentes comprimentos de onda (210-400 nm)	Possibilidade de uso de comprimento específico para cada processo
Voltagem	110 – 240 V AC; 0,5 – 2,0 amps	6 – 30 V DC; 0,02 amps	Possibilidade de uso de bateria ou célula solar
Vida útil	3000 – 12000 h	3000 h (para 250 nm) – 26000 h (para 365 nm)	Vida útil mais longa

Além do custo relativamente baixo associado ao uso dos LEDs-UVC, a tecnologia se apresenta como uma alternativa mais sustentável e ecologicamente favorável devido à ausência de mercúrio em sua composição e ao baixo consumo de energia. De modo geral, no Quadro 4 são descritas as vantagens e desvantagens dos LEDs-UVC em comparação com o sistema convencional de desinfecção por UVC.

Yin e Shang (2018) destacam que, além das vantagens mencionadas, a versatilidade dos LEDs-UVC em fornecer comprimentos de onda específicos amplia sua aplicabilidade para inativação de microrganismos. No entanto, os autores apontam como desvantagens e principais limitações dos LEDs-UVC, no estágio atual de desenvolvimento, a baixa eficiência de conversão de energia, a baixa potência de emissão e os altos custos de produção. Em contrapartida aos altos custos, o desenvolvimento de LEDs-UVC desde 2007 tem seguido a Lei de Haitz, que prevê um aumento de 20 vezes na produção de LEDs e uma redução de 10 vezes no custo de produção.

Neste seguimento, em 2008 o mercado de iluminação UV era avaliado em US$ 400 milhões. Já em 2015, somente os LEDs - UV valiam US$ 100 milhões. Com as aplicações de LEDs em desinfecção e esterilização, o mercado total foi avaliado em US$ 1 bilhão em 2019, com um aumento de 30% no ano seguinte devido à pandemia da COVID -19. No contexto, a Yole *Developpement*, projeta que o mercado será avaliado em US$ 3,5 bilhões em 2026, com uma taxa de crescimento anual composta de 17,8% entre 2021 e 2026 (YOLE GROUP, 2021).

Considerando as vantagens e as perspectivas de aplicação da tecnologia LEDs-UVC, este trabalho se propõe a apresentar os fundamentos essenciais dessa tecnologia, bem como discutir os resultados encontrados na literatura acerca de sua aplicação na inativação de microrganismos patogênicos e potencialmente patogênicos.

3.3.1 Fundamentos de LEDs – UV

O Diodo Emissor de Luz, ou *Light Emitting Diode* (LED), é um dispositivo semicondutor que converte corrente contínua (DC) em luz, emitindo fótons com comprimentos de onda variados. Isso ocorre devido à recombinação radiativa de elétrons de alta energia para estados de baixa energia dentro do material semicondutor, conforme estabelecido pela relação de Planck-Einstein (CHEN; LOEB e KIM, 2017; SIMONS; PAGAN e LAWAL, 2018).

Um diodo semicondutor consiste na junção de uma camada de semicondutor tipo n com outra de semicondutor tipo p. No semicondutor tipo n, os portadores de carga, que são as partículas

que conduzem eletricidade, são elétrons livres, enquanto no semicondutor tipo p são buracos livres, que são defeitos com carga positiva. Em semicondutores dopados, tanto os elétrons quanto os buracos são introduzidos pelos átomos dopantes. Na junção entre um material tipo n (cátodo) e um tipo p (ânodo), os elétrons próximos à junção se movem da região n para p, enquanto os buracos se movem no sentido oposto.

Para LEDs - UV, a junção p-n é formada substituindo-se um elemento semicondutor tipo p do grupo II (por exemplo, Mg) por uma impureza do grupo III (por exemplo, Ga ou Al em AlGaN). Os elementos de impureza do grupo III têm um elétron de valência a menos, o que cria um buraco com deficiência de elétrons. Da mesma forma, no semicondutor tipo n, substitui-se um elemento do grupo IV (por exemplo, Si), que tem um elétron de valência a mais, por um elemento do grupo III, criando assim um elétron livre (CHEN; LOEB e KIM, 2017; UFMG, 2014).

Quando elétrons e buracos se encontram, eles se recombinam formando uma região conhecida como região de depleção, na qual os íons positivos e negativos dopantes ficam desprovidos de portadores de carga. Nessa região, os íons criam um campo elétrico que impede a continuidade da difusão de elétrons e buracos, necessitando de uma fonte externa para que o processo ocorra. Ao ser conectada a uma fonte de alimentação, uma junção p-n permite o fluxo de corrente apenas em um sentido – da região p para a região n. Quando os elétrons da região n se recombinam com os buracos da região p, o excesso de energia é liberado na forma de luz e calor (CHEN; LOEB e KIM, 2017; UFMG, 2014).

A quantidade de energia liberada, e consequentemente o comprimento de onda da luz emitida, é determinada pela diferença entre as bandas de condução e de valência, uma propriedade intrínseca dos semicondutores utilizados conhecida como *bandgap*. Isso significa que o comprimento de onda dos fótons emitidos pode ser ajustado pelo uso de diferentes materiais semicondutores e pela dopagem com íons de impurezas em concentrações variáveis. Essa capacidade de gerar comprimentos de onda específicos distingue os LEDs das lâmpadas de mercúrio convencionais, onde apenas o vapor de mercúrio, junto com uma estrutura eletrônica, é utilizado para produzir luz (SIMONS; PAGAN e LAWAL, 2018).

Entre os materiais usados na construção dos LEDs, destaca-se o uso frequente de materiais à base de nitreto, como nitreto de gálio (GaN), nitreto de gálio e alumínio (AlGaN), nitreto de

alumínio (AlN) e nitreto de alumínio, gálio e índio, devido à capacidade de gerar comprimentos de onda na faixa germicida (UVC).

3.3.2 Aspectos de fabricação e construtivos

LEDs UV são fabricados pelo método epitaxial onde filmes finos de material são depositados sobre um substrato e a composição do material é ajustada para controlar as propriedades resultantes. A confecção por tal método permite que a estrutura do dispositivo possa ser finamente controlada ajustando-se a composição em escalas manométricas. O LED UV, uma vez fabricado, normalmente no formato de um chip, apresenta medida da ordem de 1 mm², podendo ser embalado e distribuído como um único chip ou dispositivos multi-chips que incorporam uma caixa protetora e contatores elétricos (SIMONS, PAGAN e LAWAL, 2018).

De acordo com Chen, Loeb e Kim (2017), uma pequena peça semicondutora com junção do tipo p-n, gerando luz, é chamada de chip LED. Um semicondutor AlGaN com junção p-n é tipicamente fabricado por deposição de camada sobre camada (ou seja, camada tipo n seguida de camada tipo p) até o topo onde encontra-se uma lente óptica de substrato de safira (α-Al2O3). Sendo as camadas cuidadosamente depositadas a partir da fase gasosa de reações químicas com o substrato por um processo conhecido como Epitaxia em Fase de Vapor Metalorgânico (MOVPE).

O processo MOVPE é amplamente usado para fabricação industrial de chips LED, especialmente para LEDs – UVC. Onde as mudanças na composição do gás, temperatura e/ou pressão no reator de deposição permite o controle cuidadoso sobre a espessura e estrutura da camada semicondutora. No entanto, durante o processo de construção dos LEDs ineficiências podem ser introduzidas se ocorrerem defeitos na rede cristalina durante o processo epitaxial. Defeitos como o deslocamento de camadas podem ser gerados tanto devido à grande incompatibilidade das redes cristalinas, quanto da incompatibilidade do alto coeficiente térmico entre safira e GaN, resultando assim em recombinação não reativa entre os semicondutores presentes nos LEDs. Sendo os defeitos mais suscetíveis de serem observados em semicondutores de geração de ondas curtas (CHEN, LOEB e KIM, 2017).

Após a deposição das camadas pela técnica epitaxial, a camada tipo p é parcialmente furada para exposição da camada tipo n, permitindo a fixação de liga de metais condutores como Ni/Au, consequentemente, formando os eletrodos p (ânodo) e n (cátodo), uma vez fixados um potencial elétrico é fornecido através desses eletrodos, permitindo a produção de luz por baixa

corrente e mecanismos de recombinação. O chip resultante é conhecido como um chip convencional (CC), sendo o tipo mais amplamente adotado na indústria devido ao seu custo de fabricação relativamente baixo e estabilidade térmica (CHEN; LOEB e KIM, 2017).

A evolução da potência de saída com o tempo de operação é um parâmetro importante que deve ser considerado. Ao contrário das tecnologias de fonte de luz tradicionais, os LEDs apresentam uma degradação gradual da eficiência (e assim da potência de saída) ao longo de sua vida. A vida útil de um LED é, portanto, normalmente denotada como o tempo para atingir uma determinada potência de saída, podendo ser expressa como L70 para 70%, L50 para 50% e assim por diante. Cabendo destacar que, atualmente, os LEDs UV operando com emissão de luz na faixa de comprimento de onda de 265 – 280 nm atingem valores de L70 maiores que 10.000 horas. A potência requerida para o funcionamento do LED UV varia entre fabricantes, linha de produção e aplicação. No entanto, podem ser citados requisitos gerais para um único LED como corrente elétrica variando de 100 – 500 mA, tensão de 5 – 7 V, gerando assim um consumo de energia que varia de 0,5 a 3,5 W (SIMONS; PAGAN e LAWAL, 2018).

A fim de proteger a região das condições ambientes e permitir que o LED funcione para uma aplicação específica, o chip semicondutor é alojado em um pacote consistindo em vários componentes, completando o processo de fabricação. Embora existam vários projetos e alterações, uma montagem típica consiste em fios elétricos, um dissipador de calor, uma janela óptica e componentes auxiliares. A montagem do LED UVC é similar a montagem do LED de luz visível, mas com características distintas para acomodar os constituintes do chip UVC. Na montagem de LED visível um encapsulante de polímero preenche o espaço vazio entre o chip e a janela óptica com função de proteção, ao mesmo tempo em que melhora a emissão de luz por evitar mudanças no índice de refração. Entretanto, como os materiais poliméricos absorvem radiação UVC esses não podem ser utilizados na construção de LED UVC, onde a estrutura encapsulante geralmente é o quartzo (CHEN; LOEB e KIM, 2017).

3.3.3 Propriedades do LED UVC

A Figura 12 extraída de Chen; Loeb e Kim (2017) ilustra os dados hipotéticos geralmente utilizados na caracterização do desempenho de LED UVC. Observa-se na Figura 12 a) que o espectro de emissão da luz UV é apresentado em termos de intensidade máxima de comprimento de onda e largura do pico de intensidade máxima, definida pela largura total na metade do pico máximo (FWHM). Observa-se no gráfico que o LED apresenta emissão

praticamente monocromática em forma de curva Gaussiana como resultado da geração de luz do mecanismo de estado sólido. Cabendo recordar que o comprimento de onda é determinado pelo *bandgap* do material semicondutor do chip, uma vez que a energia do *bandgap* é igual a energia de emissão do fóton.

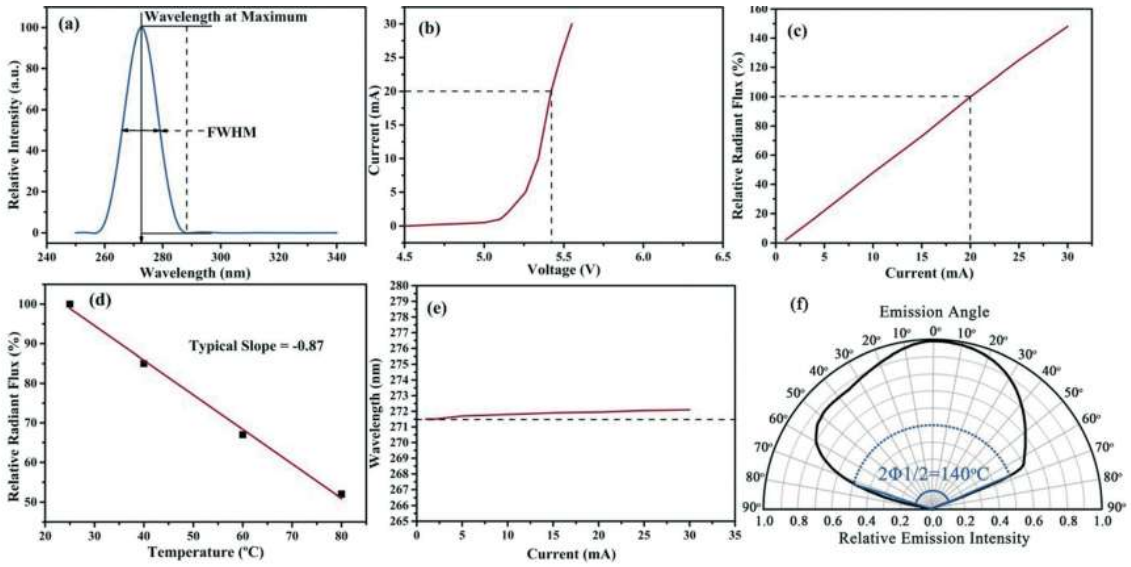


Figura 12 – Propriedades de um LED UVC. Fonte: (CHEN; LOEB e KIM, 2017)

De acordo com Schiler (1997) a capacidade dos chips LED UV de converter eletricidade em fótons é definida por dois termos de eficiência: Eficiência Quântica Interna (EQI) e Eficiência Quântica Externa (EQE). O EQI defini o número de fótons emitidos da região ativa por elétrons injetados no LED, conforme a Equação 22:

$$\eta_{int} = \frac{\frac{\text{Fótons (região ativa)}}{s}}{\frac{\text{elétrons}}{s}} = \frac{\frac{P\ int}{hv}}{\frac{I}{e}} \quad (22)$$

Onde

Pint é a potência óptica emitida da região ativa, I é a corrente e, e é a carga elementar de um elétron.

No entanto, de acordo com Chen; Loeb e Kim (2017), apenas uma fração dos fótons gerados pode escapar do LED devido a perda por absorção, refração e reflexão devido aos componentes do chip. Logo, a eficiência luminosa do LED pode ser definida conforme Equação 23:

$$\eta_{extração} = \frac{\frac{\text{Fótons (emitidos do dispositivo)}}{s}}{\frac{\text{Fótons (região ativa)}}{s}} = \frac{\frac{P}{hv}}{\frac{Pint}{hv}} \quad (23)$$

Onde P é a potência óptica emitida pelo dispositivo.

A eficiência do LED em termos do número de fótons utilizáveis, produzidas pela indução de energia, ou seja, a EQE, é definida pela Equação 24:

$$\frac{\frac{\text{Fótons (emitidos do dispositivo)}}{\text{s}}}{\frac{\text{elétrons}}{\text{s}}} = \frac{\frac{\text{P}}{\text{hv}}}{\frac{\text{I}}{\text{e}}} = \eta_{\text{extração}} \cdot \eta_{\text{int}} \quad (24)$$

O fluxo radiante de qualquer lâmpada é definido como a energia radiante total emitida por unidade de tempo (mW) e é calculado integrando a potência de saída em todos os comprimentos de onda de emissão. Para lâmpadas policromáticas de médio vapor de mercúrio isso significa o somatório de emissão de todos os comprimentos de onda, enquanto para lâmpadas de baixa pressão (LP) 95% da emissão de energia é em 254 nm. Desta forma, o fluxo radiante do LED é semelhante às LP, com a vantagem de que o pico de emissão pode ser ajustado para diferentes comprimentos de onda dependendo do material de fabricação do chip (CHEN; LOEB e KIM, 2017). O fluxo radiante de um LED é apresentado na Figura 12 c).

No entanto, à medida que mais energia é aplicada, mais calor é gerado e a temperatura da região ativa tende a aumentar, resultando em uma diminuição do fluxo de radiação devido ao aumento da probabilidade de recombinação não radiativa dos semicondutores, conforme apresentado na Figura 12 d). O excesso de calor também pode resultar em um desvio no comprimento de onda emitido, conforme o demonstrado na Figura 12 e), no entanto, o desvio pode ser desconsiderado para aplicações de desinfecção. O padrão de radiação do LED é normalmente ilustrado usando um diagrama angular, conforme Figura 4.2 f), que descreve a abertura do ângulo de visão (ou seja, o grau de propagação da luz, geralmente próximo a 120º) e a intensidade de emissão do ângulo específico (mostrado como a distância da origem) (CHEN; LOEB e KIM, 2017).

Os autores supracitados destacam ainda que a vida útil do LED não depende apenas da vida útil do chip, mas também da tecnologia de construção/acabamento, potencial de dissipação de calor e tensão de operação. De modo geral, a vida útil real depende muito das condições de aplicação, onde, LEDs operados com tensão ou corrente abaixo do limite máximo estabelecido pelos fabricantes podem estender a vida útil e proteger o dispositivo. Outras propriedades especiais, como a resistência a umidade, são frequentemente listadas na folha de dados do produto e podem ser de interesse específico para aplicações em desinfecção de água.

3.3.4 Eficácia da Inativação LEDs – UV em Diferentes Comprimentos de Onda

O comprimento de onda desempenha um papel fundamental no processo de inativação de microrganismos por UV, devido à relação entre a absorção pelo DNA/RNA e o comprimento de onda de máxima eficiência capaz de formar dímeros no material genético dos microrganismos. Estudos indicam que a curva de absorção do DNA mostra maior absorbância na faixa de 260 a 280 nm, uma região de baixa emissão para lâmpadas de vapor de mercúrio, mas acessível para LEDs-UVC. No entanto, a sensibilidade dos microrganismos pode não seguir diretamente essa relação de espectro de absorbância, tornando essencial uma análise integrada dos resultados de inativação. Neste contexto, a tecnologia LED tem se mostrado viável devido à sua capacidade de emitir radiação em comprimentos de onda específicos, abrangendo as regiões de UV-A, UV-B e UV-C. Na Tabela 7, são resumidos os dados para inativação de microrganismos utilizando LEDs na faixa UVA.

Tabela 7 – Eficiência da Inativação de LED UVA para bactérias.

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Dose UV (mJ/cm²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mJ/cm² por Log de inativação)	Referência
365	*E. coli* DH5α	54.000	3,9	13,84	(MORI et al. 2007)
365	*E. coli* DH5α	315.000	5,7	55,26	(HAMAMOTO et al. 2007)
365	Bactérias Mesófilas	4,22	0,3	12,5	(CHEVREMONT et al., 2012a)
405	Bactérias Mesófilas	25,58	0,3	88,0	(CHEVREMONT et al., 2012a)

Chevremont et al. (2012 a), ao estudarem a inativação de bactérias mesófilas com radiação UVA, identificaram que uma dose de resposta de 88 mJ/cm² por log foi necessária para um comprimento de onda de 405 nm, enquanto apenas 12,5 mJ/cm² por log foram necessários para 365 nm. Esses resultados destacam a baixa eficiência da radiação UVA, já que a dose requerida é relativamente alta para uma redução modesta na concentração de microrganismos. No mesmo estudo, os autores também investigaram a influência da densidade da cultura bacteriana e do pH na eficácia da inativação, observando uma dependência entre o pH e a densidade, o que sugere que o efeito de inativação é afetado pela turbidez do meio. No entanto, como a densidade da cultura bacteriana não é um parâmetro facilmente ajustável nas operações rotineiras das estações de tratamento, a análise da inativação por UV geralmente se concentra na variação do comprimento de onda e do tempo de exposição.

Em estudos sobre a inativação de *E. coli* DH5α não patogênica em amostras de água utilizando LEDs - UVA (365 nm), Mori et al. (2007) observaram um decréscimo de 3,9 logs com uma

dose UV de 54.000 mJ/cm². Em contraste, Hamamoto et al. (2007) alcançaram uma redução de 5,7 logs com uma dose de 315.000 mJ/cm², aproximadamente 40% superior, demonstrando que o mesmo microrganismo pode apresentar diferentes níveis de resistência à inativação no mesmo comprimento de onda.

Apesar das doses elevadas, ambos os estudos concluem que os LEDs - UVA são viáveis para o processo de inativação. No entanto, é ressaltado que o UVA não possui a mesma capacidade de inativação em doses tão baixas quanto o UVC, o que implica em tempos de exposição mais longos e, consequentemente, maior consumo de energia para alcançar eficiência similar. Na Tabela 8, encontram-se os dados de inativação para microrganismos na faixa UVB.

Tabela 8 – Eficiência da Inativação de LED UVB para bactérias, bacteriófagos e vírus.

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Dose UV (mJ/cm²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mJ/cm² por Log de inativação)	Referência
		Bactérias			
365	*E. coli* DH5α	54.000	3,9	13,84	(MORI et al. 2007)
365	*E. coli* DH5α	315.000	5,7	55,26	(HAMAMOTO et al. 2007)
280	*Tetraselmis*	100	2,2	45,5	(CHOI et al., 2009)
282	*B. Subtilis*	60	7,2	8,3	(WÜRTELE et al., 2011)
280	Bactérias Mesófilas	1,37	1,4	1,0	(CHEVREMONT et al., 2012a)
280	*E. coli* K12 (IFO 3301)	13,8	4	3,5	(OGUMA et al., 2013)
310	*E. coli* K12 (IFO 3301)	56,9	0,6	94,8	(OGUMA et al., 2013)
280	*E. coli* K12 (ATCC29425)	9,67	3	3,22	(BECK et al., 2017)
280	*E. coli* (CGMCC 13373)	15,35	4,5	3,41	(LI et al., 2017)
280	*E. coli* (IFO 3301)	9,2	4	2,3	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
300	*E. coli* (IFO 3301)	80	4	20	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
280	*B. subtilis*	50	4	12,5	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
300	*B. subtilis*	1200	4	300	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
280	*P. aeruginosa*	7,5	3	2,5	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
300	*P. aeruginosa*	62	3	20,66	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
280	*L.pneumophila*	9	4	2,25	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
300	*L.pneumophila*	85	4	21,25	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
285	*E. coli* (ATCC 11229)	15,3	2,8	5,46	(SONG; TAGHIPOUR e MOHSENI, 2019)
		Bacteriófagos			
280	*φx174*	8,9	3,2	2,8	(AOYAGI et al., 2011)
280	Qβ	43	1,5	28,7	(AOYAGI et al., 2011)
280	*MS2*	58	1,9	30,5	(AOYAGI et al., 2011)
280	MS2	38,5	2	19,25	(BECK et al., 2017)
280	Qβ	74	4	18,5	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
300	Qβ	600	4	150	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
285	*MS2*	40	2,75	14,54	(SONG; TAGHIPOUR e MOHSENI, 2019)
		Vírus			
280	HAdV2	105	4	26,25	(BECK et al., 2017)

Oguma et al. (2013), utilizando LEDs - UVB para inativação da *E. coli* K12 (IFO 3301), observaram que no comprimento de onda de 310 nm, houve uma inativação de 0,6 log com uma dose aplicada de 56,9 mJ/cm², resultando em uma dose de resposta de 94,8 mJ/cm². Esse resultado foi menos eficaz quando comparado com doses observadas em comprimentos de onda menores, como 280 nm (3,5 mJ/cm² por log), indicando a limitada eficácia dos LEDs - UVB em 310 nm para inativação de forma isolada.

Em um experimento de inativação utilizando comprimento de onda de 300 nm, Rattanakul e Oguma (2018) avaliaram os microrganismos *E. coli* (IFO 3301), *B. subtilis*, Qβ, *P.aeruginosa* e *L. pneumophila*, reportando doses de resposta de 20, 300, 150, 20,66 e 21,25 mJ/cm² por log, respectivamente. Esses resultados demonstram que a eficiência germicida varia entre os microrganismos, mesmo para o mesmo comprimento de onda.

Destaca-se que a *E. coli* mostrou menor sensibilidade à radiação UVB em comparação com microrganismos patogênicos como *P. aeruginosa* e *L. pneumophila* e o bacteriófago Qβ. Apesar de uma redução de 4 logs observada na maioria dos microrganismos, os altos valores de dose resposta indicam a ineficiência da radiação UVB de 300 nm para inativação em doses mais baixas, como aquelas esperadas na faixa UVC.

A Tabela 9 condensa os dados de inativação para diferentes comprimentos de onda na faixa UVC.

Li et al. (2019) destacam que em experimentos de inativação de microrganismos utilizando LEDs - UV, diferentes espécies mostram diversas curvas de absorção, resultando em resistências distintas à inativação. A faixa de absorbância entre 260 e 280 nm é indicativa de fortes propriedades de inativação, porém, foi observada uma eficiência ligeiramente menor no comprimento de onda de 280 nm em comparação com 260 nm. Apesar disso, o comprimento de onda de 280 nm tem sido reconhecido como a escolha ideal para inativação de microrganismos, devido à sua eficiência, menor consumo de energia e custo acessível.

Choi et al. (2009) investigaram a inativação de *Tetraselmis* por radiação UVC em comprimentos de onda de 255, 265 e 280 nm, registrando log de inativação de 2,2; 2,6 e 2,2, respectivamente, para uma dose aplicada de 100 mJ/cm². Isso se traduziu em uma dose de resposta de 45,5; 38,46 e 45,5 mJ/cm² por log de inativação, respectivamente. Os resultados não apenas demonstram que o mesmo microrganismo apresenta respostas diferentes a

diferentes comprimentos de onda, mas também indicam uma maior eficiência de inativação no comprimento de onda de 265 nm, conforme observado por Li et al. (2019).

Tabela 9 – Eficiência da Inativação de LEDs - UVC para bactérias, bacteriófagos e vírus.

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Dose UV (mJ/cm²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mJ/cm² por log de inativação)	Referência
		Bactérias			
265	*E. coli* K12 (ATCC 29425)	20	3,4	5,9	(CHATTERLEY e LINDEN, 2010)
255	*Tetraselmis*	100	2,2	45,5	(CHOI et al. 2009)
265	*Tetraselmis*	100	2,6	38,46	(CHOI et al. 2009)
255	*E. coli* (ATCC 11229)	9	2,7	5,3	(BOWKER et al., 2011)
275	*E. coli* (ATCC 11229)	9	3,8	2,4	(BOWKER et al., 2011)
269	B. Subtilis	40	5,9	6,8	(WÜRTELE et al., 2011)
254	Bactérias Mesófilas	0,73	0,8	1,0	(CHEVREMONT et al., 2012 a)
265	*E. coli* K12 (IFO 3301)	10,8	4	2,7	(OGUMA et al., 2013)
260	*E. coli* K12 (ATCC29425)	10,34	3	3,44	(BECK et al., 2017)
265	*E. coli* (CGMCC 13373)	10,91	4,5	2,42	(LI et al., 2017)
255	*E. coli* (ATCC 15597)	20	4	5	(ZHOU et al., 2017)
267	*E. coli* (CGMCC 13373)	11,52	4	2,88	(NYANGARESI et al., 2018)
275	*E. coli* (CGMCC 13373)	23,04	4	5,76	(NYANGARESI et al., 2018)
265	*E. coli* (IFO 3301)	5	4	1,25	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
265	*B. subtilis*	23	4	5,75	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
265	*P. aeruginosa*	4,2	3	1,3	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
265	*L.pneumophila*	4	4	1	(SONG; TAGHIPOUR e MOHSENI, 2019)
265	*E. coli* (ATCC 11229)	4,2	1,8	2,33	(SHEN et al., 2020)
268	TRB - 3	15,36	5,4	2,84	(SHEN et al., 2020)
245	TRB - 3	15,36	5,4	2,84	(SHEN et al., 2020)
268	TRB -5	23,04	5,7	4,04	(SHEN et al., 2020)
245	TRB -5	30,72	5,7	5,38	(SHEN et al., 2020)
		Bacteriófagos			
255	*φx174*	6,4	3,7	1,7	(AOYAGI et al., 2011)
255	*Qβ*	30	2,4	12,5	(AOYAGI et al., 2011)
255	*MS2*	41	3,2	12,8	(AOYAGI et al., 2011)
255	*MS2*	60	2,3	26,1	(BOWKER et al., 2011)
275	*MS2*	60	2,1	28,6	(BOWKER et al., 2011)
255	*T7*	20	3,9	5,1	(BOWKER et al., 2011)
275	*T7*	20	4,7	4,3	(BOWKER et al., 2011)
260	*MS2*	30,3	2	15,5	(BECK et al., 2017)
266	*MS2*	9	7	1,28	(KIM; KIM e KANG, 2017)
266	*φx174*	1	7	0,14	(KIM; KIM e KANG, 2017)
266	*Qβ*	9	7	1,28	(KIM; KIM e KANG, 2017)
279	*MS2*	9	6	1,5	(KIM; KIM e KANG, 2017)
279	*φx174*	2	6	0,33	(KIM; KIM e KANG, 2017)
279	*Qβ*	9	6	1,5	(KIM; KIM e KANG, 2017)
265	*Qβ*	48	4	12	(RATTANAKUL e OGUMA, 2018)
265	*MS2*	4,9	2,5	1,96	(SONG; TAGHIPOUR e MOHSENI, 2019)
		Vírus			
260	*HAdV*2	122,89	4	30,72	(BECK et al., 2017)

Para avaliar os efeitos dos LEDs - UVC sobre os microrganismos estudados, os autores acima mencionados utilizaram microscopia de fluorescência para contar o número de organismos imediatamente após a exposição e cinco dias depois. Observaram-se modificações na estrutura das células e redução no número de organismos após cinco dias, sugestivas de danos no DNA e consequente supressão na multiplicação celular devido à ação da radiação UV

Aoyagi et al. (2011) utilizaram LEDs - UVC nos comprimentos de onda de 255 nm e 280 nm para inativar os bacteriófagos *φx174*, Qβ e *MS2*, dada a resistência comparável desses microrganismos à radiação UV em relação ao *Cryptosporidium*. Os resultados mostraram doses de resposta por log de inativação de 1,7 mJ/cm² (255 nm) e 2,8 mJ/cm² (280 nm) para o bacteriófago *φx174*, resultando em eficiências de inativação próximas de 3,7 e 3,2 logs, respectivamente. No entanto, para os bacteriófagos *MS2* e Qβ, a eficiência de inativação foi maior em 255 nm (3,2 e 2,4 logs) do que em 280 nm (1,9 e 1,5 log, respectivamente), resultando em doses de resposta aproximadamente 75% e 170% mais elevadas.

Apesar da menor eficiência na inativação de *MS2* e Qβ em 280 nm, este comprimento de onda mostrou-se eficaz, o que é promissor considerando o menor custo em comparação com LEDs de 255 nm. Além disso, os autores destacaram que a eficiência quântica externa dos LEDs - UVC em 280 nm é quase 10 vezes superior à observada em 255 nm. Embora a eficiência de inativação para os bacteriófagos *MS2* e Qβ tenha sido quase o dobro em 255 nm, a eficiência total para 280 nm foi quase cinco vezes maior.

Chantterley e Linden (2010), em um experimento para inativação de *E. coli* K12 (ATCC 29425), compararam a eficiência da lâmpada de baixa pressão de vapor de mercúrio (LP - 254 nm) com LEDs - UVC (265 nm). Os resultados mostraram uma dose de resposta de 5,9 mJ/cm² por log para os LEDs, em comparação com 6,89 mJ/cm² por log para LP. O valor encontrado para LP está acima do valor usualmente reportado para esse tipo de lâmpada (2 mJ/cm²), enquanto os valores encontrados para os LEDs foram próximos daqueles reportados por Bowker et al., (2011) para inativação em 255 nm. Um dos fatores que pode ter contribuído para o melhor desempenho dos LEDs é o fato de seu comprimento de onda estar próximo do espectro de absorção do microrganismo.

Bowker et al. (2011) investigaram a inativação por UVC utilizando lâmpada de baixa pressão de vapor de mercúrio (LP - 254 nm) e LEDs (255 e 275 nm) para *E. coli* (ATCC 11229), *MS2* e T7. A dose de resposta para os LEDs a 275 nm foi de 2,4 mJ/cm² por log de inativação,

inferior aos 5,3 mJ/cm² por log observados para 255 nm. Ambas as doses foram superiores àquela relatada para LP (1,89 mJ/cm² por log, com dose de 7 mJ/cm² resultando em 3,7 log de inativação, próximo do padrão para LP de 8 mJ/cm² e 4 logs). Os resultados sugerem que a variação na intensidade da luz UVC pode não ser o único fator influenciando a diferença de eficácia entre LP e LEDs de 255 nm, possivelmente relacionada à absorção desigual de fótons pelos microrganismos. Essas disparidades indicam que a eficácia germicida está diretamente ligada aos espectros de absorção específicos dos microrganismos estudados. Os achados foram inesperados, especialmente considerando a proximidade dos comprimentos de onda testados. Além disso, os autores destacam que o desempenho superior dos LEDs de 275 nm pode ser atribuído ao espectro de absorção das proteínas, que têm seu pico máximo de absorção próximo a 280 nm, aumentando a probabilidade de danos nas enzimas de reparo e consequente redução na capacidade de reparação (foto ou *dark*).

Em relação à inativação de *MS2* e T7, os autores mencionados concluíram que o *MS2* apresentou uma cinética semelhante entre LP e 255 nm, com um resultado ligeiramente superior para LP. Por outro lado, os experimentos com T7 utilizando o comprimento de onda de 275 nm mostraram uma cinética ligeiramente superior em comparação com LP e 255 nm. Esses resultados foram consistentes com os espectros de ação desses vírus, visto que o pico de absorção para *MS2* ocorre em torno de 260 nm, enquanto para T7 é cerca de 270 nm.

No entanto, os resultados para *E. coli* não foram conforme o esperado, uma vez que o seu espectro de ação apresenta um pico entre 260 e 265 nm, mais próximo do comprimento de onda de 255 nm (SONG; MOHSENI e TAGHIPOUR, 2016). É importante ressaltar a diferença na dose de resposta entre os estudos realizados por Aoyagi et al., (2011) e Bowker et al., (2011) para o *MS2* no comprimento de onda de 255 nm. No primeiro estudo, foi encontrada uma dose de resposta por log de inativação de 12,8 mJ/cm², cerca de 50% inferior à dose encontrada no segundo estudo, evidenciando que o mesmo microrganismo pode apresentar comportamentos distintos para o mesmo comprimento de onda.

A maior inativação da *E. coli* nos experimentos com 275 nm pode ser explicada pela maior potência de emissão em comparação com 255 nm, resultando em valores mais altos de irradiância e tempos de exposição mais curtos para alcançar a mesma fluência. Hipoteticamente, a inativação de microrganismos por UV segue a lei de reciprocidade de Bunsen-Roscoe, que postula que o efeito fotoquímico depende apenas da dose total de energia, ou seja, o produto da

taxa de fluência pelo tempo de exposição (BOWKER et al., 2011; LI et al., 2019; SONG; MOHSENI; TAGHIPOUR, 2016).

No entanto, têm sido observados desvios dessa lei em testes com alguns microrganismos, sugerindo que a inativação UV pode não depender exclusivamente de reações fotoquímicas, mas também de processos biológicos específicos. Portanto, o desvio da lei de reciprocidade em organismos como a *E. coli* pode ocorrer devido às variações nos processos biológicos induzidos pela radiação UV, com alguns microrganismos sendo mais sensíveis às taxas de fluência do que outros (SONG; MOHSENI e TAGHIPOUR, 2016).

Oguma et al. (2013) e Rattanakul e Oguma (2018) conduziram estudos de inativação da *E. coli* (IFO 3301) utilizando LEDs - UVC operando a 265 nm, relatando doses de resposta de 2,7 e 1,25 mJ/cm² por log de inativação, respectivamente. A diferença na eficiência observada pode ser atribuída às melhorias nas características de fabricação dos LEDs - UV ao longo do tempo, resultando em menor consumo de energia, maior fluxo radiante e maior eficiência. Rattanakul e Oguma (2018) compararam LEDs - UVC com lâmpadas de baixa pressão (LP) para a inativação de 4 logs, relatando uma dose de resposta de 1,23 mJ/cm² por log para LP, valor consistente com o frequentemente observado para esse tipo de lâmpada e próximo ao encontrado no experimento com LEDs - UVC, evidenciando o avanço na eficiência dos LEDs ao longo das atualizações na produção. Em resumo, apesar das variações entre os estudos, é possível afirmar que os LEDs - UVC operando a 265 nm demonstram eficácia na inativação da *E. coli*.

Em estudos de inativação da *E. coli* (CGMCC 13373) utilizando LEDs - UVC operando a 265 nm, Li et al. (2017) e 267 nm, Nyangaresi et al. (2018) reportaram doses de resposta por log de inativação de 2,42 mJ/cm² e 2,88 mJ/cm², respectivamente. Esses resultados indicam que para o mesmo microrganismo, a variação na eficácia de inativação utilizando comprimentos de onda próximos ou dentro da faixa de absorção do DNA tende a ser mínima.

No estudo de Li. et al., (2017), também foi relatada uma dose de resposta por log de inativação de 2,77 mJ/cm² para lâmpadas de baixa pressão (LP), destacando que o sistema LED operou com eficiência considerável, beneficiado pela maior potência de emissão comparada à LP.

Um comportamento similar foi observado no estudo de inativação do bacteriófago *MS2* com LEDs - UVC operando em 266 nm, Kim; Kim e Kang, (2017), e 265 nm, Song; Taghipour e Mohseni, (2019), com doses de resposta por log de inativação de 1,28 e 1,96 mJ/cm²,

respectivamente. Esses resultados sugerem uma maior eficiência de inativação dos organismos quando utilizados comprimentos de onda próximos ao pico de absorção do DNA.

Além disso, conforme relatado por Kim; Kim e Kang, (2017), as lâmpadas de baixa pressão (LP) mostraram-se menos eficientes na inativação do bacteriófago, apresentando uma dose de resposta de 2,43 mJ/cm² por log.

Na tabela 10 estão apresentados os resultados para uso combinado de LEDs operando nas faixas UVA, UVB e UVC do espectro eletromagnético para inativação de microrganismos.

Chevremont et al. (2012a) investigaram a inativação de bactérias mesófilas utilizando LEDs - UVA acoplados a LEDs - UVB, relatando uma dose resposta por log de inativação de 1,6 mJ/cm² para 280/365 nm, valor inferior ao encontrado para a combinação 254/365 nm, que foi de 2,1 mJ/cm². Um aspecto relevante do estudo foi a observação de doses de resposta mais altas para os LEDs - UVA (365 nm), com 12,5 mJ/cm² por log, em comparação com 1 mJ/cm² por log para UVC isoladamente, indicando que a combinação de LEDs UVA+UVC é mais eficaz do que LEDs - UVA sozinhos. Além disso, ao comparar os valores de log de inativação reportados, percebe-se que a combinação de LEDs UVA+UVC foi mais eficiente do que a simples soma dos efeitos individuais de cada LED operando isoladamente, como 3,5 > 0,3 + 1,4 = 1,7 logs, padrão observado também em outras combinações avaliadas.

Tabela 10 – Eficiência da Inativação de LED UV para bactérias, bacteriófagos e vírus utilizando comprimento de onda combinado UVB+UVA, UVC+UVA e UVC+UVB.

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Dose UV (mJ/cm²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mJ/cm² por Log de inativação)	Referência
Bactérias					
280/365	Bactérias Mesófilas	5,59	3,5	1,6	(CHEVREMONT et al., 2012a)
280/405	Bactérias Mesófilas	26,95	3,5	7,7	(CHEVREMONT et al., 2012a)
254/365	Bactérias Mesófilas	4,95	2,4	2,1	(CHEVREMONT et al., 2012a)
254/405	Bactérias Mesófilas	26,31	2,2	11,9	(CHEVREMONT et al., 2012a)
260/280	*E. coli* K12 (ATCC29425)	9,37	3	3,12	(BECK et al., 2017)
265/280	*E. coli* (CGMCC 13373)	13,78	4,5	3,06	(LI et al., 2017)
267/275	*E. coli* (CGMCC 13373)	15,35	4	3,83	(NYANGARESI et al., 2018)
265/285	*E. coli* (ATCC 11229)	19,5	4,6	4,23	(SONG; TAGHIPOUR e MOHSENI, 2019)
Bacteriófago					
260/280	*MS2*	32,8	2	16,4	(BECK et al., 2017)
Vírus					
260/280	HAdV2	105	4	26,25	(BECK et al., 2017)

Chevreomont et al., (2012b) demonstraram um comportamento semelhante ao estudar a inativação de *E. coli* utilizando combinações de LEDs UVA+UVC. Os autores relataram que essas combinações resultaram em efeitos superiores quando comparadas ao uso isolado de cada tipo de LED, especialmente nas combinações 280/365 nm e 280/405 nm. Apesar de se reconhecer que emissões em 254 nm são geralmente associadas ao máximo efeito germicida, os autores observaram que a combinação 280/365 nm não apenas reduziu a população microbiana proporcionalmente ao tempo de exposição, mas também oxidou 37% da creatinina e fenol, utilizados como modelos de contaminantes orgânicos.

Beck et al., (2017) investigaram a inativação de *E. coli* K12 (ATCC 29425), *MS2* e HAdV2 utilizando a combinação de comprimentos de onda 260/280 nm e lâmpada de baixa pressão de mercúrio (LP). Para a redução de 3 log de *E. coli*, os autores relataram doses de resposta por log de inativação próximas para os comprimentos de onda combinados, individualmente, e para a LP (3,66 mJ/cm²). Assim como Oguma et. al. (2013), os autores não observaram efeitos sinérgicos significativos da combinação para a inativação da *E. coli*, onde $3 < 3 + 3 = 6$ logs, mesmo considerando culturas diferentes. Para a inativação do *MS2* pela combinação de comprimentos de onda, foi relatada uma dose de resposta de 16,4 mJ/cm² por log de inativação, valor inferior ao encontrado para a LP, que foi de 19 mJ/cm² por log, sugerindo que a combinação pode ser eficaz.

Além disso, observou-se que a combinação dos comprimentos de onda foi menos eficiente do que o comprimento de onda de 260 nm operando isoladamente, porém mais eficiente do que o comprimento de onda de 280 nm. No entanto, quando os resultados são comparados em termos de log de inativação, a combinação mostrou-se menos eficaz do que os comprimentos de onda isolados, onde $2 < 2 + 2 = 4$ log.

Os resultados obtidos para a inativação do HAdV2 mostraram doses de resposta de 26,25 mJ/cm² por log, valor ligeiramente inferior ao reportado para a desinfecção com LP, que foi de 28 mJ/cm² por log. Ao contrário do observado na inativação do *MS2*, os comprimentos de onda combinados apresentaram uma eficiência superior quando comparados com a emissão isolada de 260 nm e inferior para 280 nm, possivelmente devido às diferenças no pico de absorção do DNA do microrganismo.

No entanto, quando analisamos os resultados em termos de log de inativação, a combinação mostrou-se menos eficaz do que os comprimentos de onda isolados, onde $4 < 4 + 4 = 8$ logs, e

não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas utilizando um teste t pareado bicaudal ($p < 0,05$).

Li et al. (2017) utilizaram a combinação dos comprimentos de onda de 265/280 nm para inativação da *E. coli* (CGMCC 13373), reportando doses de resposta por log de inativação de 3,06 mJ/cm², valor superior ao encontrado para a inativação com LP, que foi de 2,77 mJ/cm². Os resultados indicaram que a combinação foi menos eficaz do que o comprimento de onda operando isoladamente a 265 nm, mas mais eficiente do que o comprimento de onda de 280 nm. Os autores não relataram efeitos sinérgicos da combinação de comprimentos de onda, onde $4,5 < 4,5 + 4,5 = 9$ log. Nyangaresi et al., (2018), em estudo para inativação de *E. coli*, utilizando a mesma cultura que Li et.al, (2017), em comprimentos de onda combinados de 267/275 nm, obtiveram resultados semelhantes e não observaram efeito sinérgico.

Song; Taghipour e Mohseni, (2019) estudaram a inativação de *E. coli* (ATCC11229) utilizando combinações de comprimentos de onda de 265/285 nm, apresentando doses de resposta de 4,23 mJ/cm² por log de inativação. Esta eficiência foi superior à do comprimento de onda de 280 nm isoladamente, porém inferior à do comprimento de onda de 265 nm isoladamente. Os resultados, diferentemente dos apresentados por Beck et al., (2017); Li et al., (2017); Nyangaresi et al., (2018), foram idênticos ao somatório dos comprimentos de onda isolados, $4,6 = 1,8 + 2,8 = 4,6$. Apesar da similaridade dos resultados, os autores concluíram que não houve efeito sinérgico da combinação dos comprimentos de onda, apenas um efeito aditivo, corroborando os trabalhos mencionados. Os autores também relataram que, entre todas as combinações, a única maneira que poderia alcançar um efeito sinérgico significativo seria a exposição ao UVA antes do UVC, evitando assim os processos biológicos de reparo de DNA.

Em relação às diferentes eficiências reportadas para os LEDs operando isolados e combinados, segundo Oguma et al. (2013), explicam, de acordo com a Segunda Lei da Fotoquímica, que eventos fotoquímicos em diferentes comprimentos de onda devem ser independentes entre si. Portanto, teoricamente, os resultados para emissões combinadas deveriam ser a soma dos resultados de cada emissão isolada, a menos que alguma reação foto oxidativa exerça efeitos adicionais. Assim, qualquer desvio da lei aditiva observado em combinações de LEDs pode ser atribuído a condições experimentais diferentes, tais como: variação entre os microrganismos estudados, diferença nos comprimentos de onda utilizados e variação na configuração dos reatores.

Além disso, os autores ressaltam que os efeitos germicidas do UVC e UVB são baseados na formação de danos ao DNA/RNA que podem ser reparados por mecanismos próprios dos microrganismos. Em contraste, a UVA inativa microrganismos através da formação de espécies reativas de oxigênio (EROs), que têm a capacidade de causar danos irreparáveis às membranas celulares. Dessa forma, a combinação de diferentes comprimentos de onda pode levar a uma complexidade adicional na resposta dos microrganismos, devido aos diferentes mecanismos de inativação envolvidos.

De modo geral, as divergências apresentadas na inativação com comprimentos de onda isolados podem ser atribuídas às diferenças nos materiais e nas condições experimentais dos diversos estudos, conforme apontado por Song; Mohseni e Taghipour (2016). Entre os fatores que contribuem para essas diferenças estão o espectro de emissão, o ângulo de incidência e a distribuição da radiação. Além disso, os estudos utilizaram vários layouts de aparatos para inativação por LED-UVC e adotaram diferentes métodos para determinar a dose de inativação.

É importante destacar a ausência de uma metodologia consistente para obter a resposta dos microrganismos à dose de UV dos LEDs, bem como a falta de um protocolo padrão para determinar a dosagem de UV fornecida pelos LEDs-UVC às amostras. Essa falta de padronização torna inevitável a ocorrência de discrepâncias entre os estudos.

A Figura 13 apresenta a diferença entre o aparelho de feixe colimado e experimento para LED - UV.

O protocolo padronizado para inativação de microrganismos utilizando lâmpadas tradicionais é bem estabelecido, empregando-se o aparelho conhecido como feixe colimado em escala de bancada. Este aparelho fornece um campo uniforme de radiação em uma área de superfície, colimando os raios em um feixe paralelo que é projetado verticalmente na superfície da água. Isso permite que a radiância na superfície do líquido seja mensurada por um radiômetro, e que as correções necessárias possam ser realizadas, permitindo assim a comparação entre resultados.

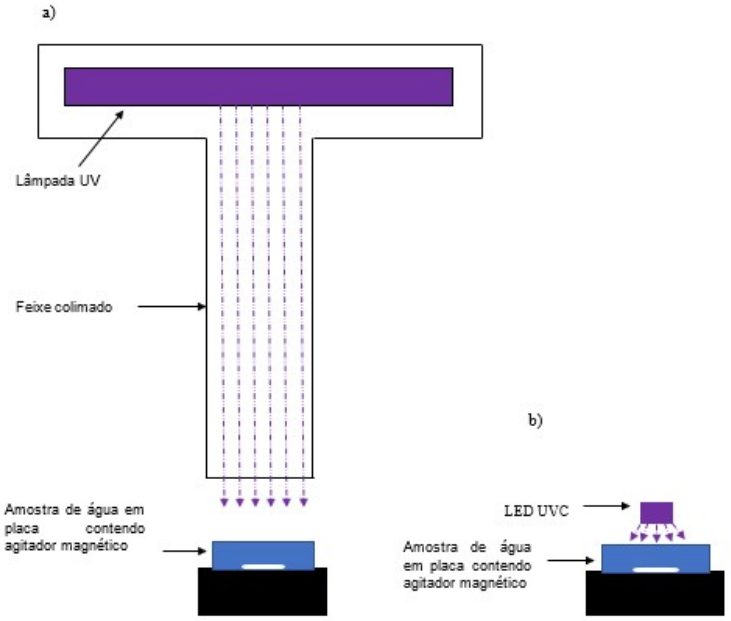


Figura 13 - Esquema de aparato de desinfecção por tubo colimado (a) e LED (b). Fonte: Adaptado de SONG; MOHSENI e TAGHIPOUR, (2016)

No entanto, devido às diferenças substanciais nas características dos LEDs e das lâmpadas tradicionais de baixa pressão (LP), não é esperado que o mesmo aparelho possa ser utilizado para testes com LEDs. Atualmente, a potência de saída de um LED-UVC é de apenas alguns miliwatts, extremamente baixa quando comparada com LP (40 W) ou lâmpadas de média pressão (MP) (30 kW). A baixa saída dos LEDs-UV tem levado à realização de experimentos com a alocação dos LEDs próximos à superfície da amostra, usualmente a 2 cm, permitindo maior fluxo de radiação e, consequentemente, várias configurações de montagem com comprimentos de onda isolados ou combinados.

Além disso, a profundidade da amostra de água é um fator importante no processo de desinfecção, devido à sua relação com a transmitância da radiação UV. Diferenças nas profundidades das amostras de água podem produzir resultados diferentes entre os estudos. Profundidades de 6 mm têm sido usualmente adotadas para esses experimentos (LI et al., 2019; SONG; MOHSENI e TAGHIPOUR, 2016). Em suma, pode-se ressaltar que para o mesmo comprimento de onda, de acordo com a dose resposta por log de inativação, a sensibilidade dos organismos à inativação tende a seguir a ordem: *φx174* ou *L.pneumophila* > *E. coli* > T7 (bacteriófagos tipo T) > *B.subtilis* > *MS2* ou Qβ > HAdV.

3.3.5 Sensibilidade dos microrganismos a LEDs UV –constante de inativação (k)

Embora a radiação UV seja eficaz contra a maioria dos agentes patogênicos presentes na água, diferentes microrganismos apresentam respostas variadas à radiação UV devido à resistência ao efeito da UV e às condições de processo. A sensibilidade dos microrganismos à UV pode ser avaliada pela constante de inativação k (cm^2/mJ), que representa a relação entre o log de inativação e a dose UV aplicada (LI et al., 2019; SONG; MOHSENI e TAGHIPOUR, 2016). De acordo com Hijnen e Medema (2005), para a aplicação da UV como principal processo de inativação, é necessário compreender a eficácia do processo de desinfecção para inativar vírus patogênicos, bactérias, esporos e cistos de protozoários relevantes para a segurança microbiológica da água. Isso requer uma visão sobre a cinética do processo de inativação, a determinação das constantes de inativação (k) e os fatores que influenciam a eficiência de inativação.

Na Tabela 11, são apresentados os valores de k para LEDs - UVC com comprimentos de onda entre 260 e 280 nm, considerando o melhor desempenho apresentado por esses comprimentos na inativação de microrganismos, e os valores para LP (254 nm) para fins de comparação. Valores alto de k significam maior sensibilidade dos microrganismos à UV e, consequente, menor dose necessária para inativação.

Os valores de k para *L. pneumophila* foram os maiores encontrados, indicando sua maior sensibilidade à UV em comparação com os demais microrganismos, independentemente da fonte de radiação. Notou-se uma maior sensibilidade em comprimentos de onda de 265 nm (k = 1 cm^2/mJ), em comparação com os comprimentos de onda de 280 nm (k = 0,44 cm^2/mJ) e 254 nm (k = 0,66 cm^2/mJ) (RATTANAKUL e OGUMA, 2018). Similarmente, a sensibilidade do *φx174* é maior em comprimentos de onda próximos a 265 nm (k = 7 cm^2/J), em comparação com os outros comprimentos de onda (AOYAGI et al., 2011; KIM; KIM e KANG, 2017).

Além disso, observa-se que os valores de k para comprimentos de onda próximo a 280 nm são semelhantes aos valores comumente reportados para LP (k = 0,39 cm^2/J), o que demonstra a viabilidade de LEDs - UVC para inativação em comprimentos de onda superiores a 254 nm (HIJNEN; BEERENDONK e MEDEMA, 2006). Os melhores desempenhos observados para comprimentos de onda entre 255 e 266 nm podem estar relacionados ao pico de absorção máximo do DNA/RNA dos microrganismos.

Tabela 11 – Sensitividade UV para LEDs e Lâmpada de baixa pressão (LP)

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Fonte de UV	K (cm²/mJ)	Referência
		Bactérias		
254	*E. coli*	LP	0,50	(HIJNEN; MEDEMA, 2005)
254	*B. subtilis*	LP	0,06	(HIJNEN; MEDEMA, 2005)
254	*E. coli* K12 (ATCC29425)	LP	0,27	(BECK et al., 2017)
254	*E. coli* (CGMC13373)	LP	0,35	(LI et al., 2017)
254	*L.pneumophila*	LP	0,66	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
260	*E. coli* K12 (ATCC29425)	UV - LED	0,29	(BECK et al., 2017)
265	*L.pneumophila*	UV - LED	1	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
265	*E. coli* K12 (IFO3301)	UV - LED	0,37	(OGUMA et al., 2013)
265	*E. coli* (CGMCC13373)	UV - LED	0,41	(LI et al., 2017)
265	*E. coli* (ATCC11229)	UV - LED	0,42	(SONG; TAGHIPOUR; MOHSENI, 2019)
265	*B. subtilis*	UV - LED	0,17	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
280	*E. coli* K12 (IFO3301)	UV - LED	0,28	(OGUMA et al., 2013)
280	*E. coli* K12 (ATCC29425)	UV - LED	0,31	(BECK et al., 2017)
280	*E. coli* (CGMCC13373)	UV - LED	0,29	(LI et al., 2017)
280	*B. subtilis*	UV - LED	0,08	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
280	*L.pneumophila*	UV - LED	0,44	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
285	*E. coli* (ATCC11229)	UV - LED	0,18	(SONG; TAGHIPOUR; MOHSENI, 2019)
		Bacteriófagos		
254	T7	LP	0,23	(HIJNEN; MEDEMA, 2005)
254	*φx174*	LP	0,39	(HIJNEN; BEERENDONK; MEDEMA, 2006)
254	*MS2*	LP	0,05	(BECK et al., 2017)
254	Qβ	LP	0,08	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
255	T7	UV - LED	0,19	(BOWKER et al., 2011)
260	*MS2*	UV - LED	0,06	(BECK et al., 2017)
265	Qβ	UV - LED	0,08	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
266	*φx174*	UV - LED	7	(KIM; KIM; KANG, 2017)
275	*MS2*	UV - LED	0,03	(BOWKER et al., 2011)
275	T7	UV - LED	0,23	(BOWKER et al., 2011)
279	*φx174*	UV - LED	0,33	(KIM; KIM; KANG, 2017)
280	*φx174*	UV - LED	0,36	(AOYAGI et al., 2011)
280	*MS2*	UV – LED	0,03	(AOYAGI et al., 2011)
280	Qβ	UV - LED	0,05	(RATTANAKUL; OGUMA, 2018)
		Vírus		
254	HAdV	LP	0,02	(HIJNEN; MEDEMA, 2005)
260	HAdV	UV - LED	0,03	(BECK et al., 2017)
280	HAdV	UV - LED	0,04	(BECK et al., 2017)

Esta maior eficiência em comprimentos de onda específicos reflete a absorção mais eficaz da radiação UV pelos ácidos nucleicos dos microrganismos, resultando em danos mais significativos e, consequentemente, em uma inativação mais eficiente. Portanto, a escolha adequada do comprimento de onda é crucial para otimizar os processos de desinfecção por UV, levando em consideração tanto a fonte de radiação quanto as características específicas dos microrganismos alvo. Tendo em vista o uso da *E. coli* como indicador de contaminação fecal em águas de abastecimento, diversos estudos têm utilizado este microrganismo na avaliação de inativação por radiação LED - UVC em diferentes comprimentos de onda, variando entre 260 e 280 nm. Nesses estudos, foram reportados valores de k variando entre 0,18 e 0,42 cm²/mJ, valores mais baixos do que aqueles reportados para *L. pneumoplhila* e *φx174*, demonstrando a

menor sensibilidade da *E. coli* (BECK et al., 2017; LI et al., 2017; OGUMA et al., 2013; SONG; TAGHIPOUR e MOHSENI, 2019).

Os diferentes valores de k reportados podem ser explicados pela diversidade das cepas utilizadas nos estudos, que podem influenciar diretamente na sensibilidade obtida, uma vez que cada organismo apresenta um espectro de absorção diferenciado. Essa premissa é observada quando comparados os valores de k para inativação com LP, que variam de 0,27 – 0,50 cm^2/J (BECK et al., 2017; HIJNEN e MEDEMA, 2005; LI et al., 2017).

Essa variabilidade nos valores de k destaca a importância de considerar as características específicas de cada cepa e o espectro de absorção ao avaliar a eficácia dos sistemas de desinfecção por UV. Além disso, a escolha do comprimento de onda e da configuração experimental pode ter um impacto significativo nos resultados, sublinhando a necessidade de padronização dos protocolos para permitir comparações mais precisas e consistentes entre os estudos.

Apesar da LP apresentar alta potência de emissão, os valores de k associados aos LEDs - UVC emitindo em 265 nm e 280 nm, são comparáveis ou até mesmo ligeiramente superiores aos da LP, o que demonstra o potencial dos LEDs para a inativação de microrganismos. Existem dois fatores principais que contribuem para as divergências nos valores encontrados: 1) as configurações dos aparatos experimentais, enquanto a LP utiliza um aparato de feixe colimado, concentrando a energia UV em um ponto específico para inativação, os LEDs - UVC geralmente estão posicionados próximos à superfície a ser tratada, com um ângulo de emissão variável e 2) A LP possui uma taxa de fluência geralmente superior à dos LEDs com emissão na mesma faixa de comprimento de onda. Além disso, a potência de emissão dos LEDs varia conforme o comprimento de onda, sendo maior próximo de 280 nm.

Somando-se a esses fatores, há a consideração da absorção máxima pelo DNA/RNA dos microrganismos entre 260 e 265 nm. Portanto, é esperado que LEDs operando nessas faixas de comprimento de onda apresentem um desempenho superior na inativação de microrganismos, devido à maior eficiência de absorção pela estrutura genética deles.

Bowker et al. (2011), ao estudarem a inativação de T7 por LEDs - UVC nos comprimentos de onda de 255 nm e 275 nm, encontraram valores de k de 0,19 cm^2/mJ e 0,23 cm^2/J, respectivamente. Esses valores são menores que os reportados para a inativação de *E. coli*, indicando uma menor sensibilidade do T7 à radiação UV. Além disso, o valor de k para a LP,

de k = 0,23 cm²/J, foi similar ao valor encontrado para o LED operando em 275 nm (HIJNEN e MEDEMA, 2005). Isso demonstra a viabilidade do uso de LEDs para a inativação do T7 e sugere que o desempenho em 275 nm está relacionado com o pico de máxima absorção do microrganismo, que parece variar entre 270 nm e 275 nm. Rattanakul e OGUMA (2018) reportaram valores de k para inativação de *B.subtilis* de 0,17 cm²/mJ utilizando LEDs de 265 nm e 0,08 cm²/J utilizando LEDs de 280 nm. Esses valores indicam uma menor sensibilidade de *B. subtilis* em comparação ao T7. Notavelmente, há uma queda significativa no valor de k reportado por Hijnen e Medema (2005) para LP, que foi de 0,06 cm²/J, quando comparado com LEDs - UVC. Comportamento semelhante é observado para LEDs - UVC operando em 254 nm (WÜRTELE et al., 2011).

A diferença significativa observada pode estar relacionada ao pico de absorção máximo do comprimento de onda do *B. subtilis*, que provavelmente varia entre 260 nm e 265 nm, e à taxa de fluência dos LEDs, que geralmente é menor para comprimentos de onda mais curtos. Esses fatores podem influenciar a eficiência de inativação, resultando em variações nos valores de k entre diferentes estudos e configurações experimentais.

A inativação do bacteriófago *MS2* por LEDs - UVC em diferentes comprimentos de onda (260, 275 e 280 nm) reportou valores de k variando entre 0,03 e 0,06 cm²/J (AOYAGI et al., 2011; BECK et al., 2017; BOWKER et al., 2011). Os valores para os comprimentos de onda de 275 e 280 nm foram praticamente idênticos, sugerindo que o *MS2* tem uma menor sensibilidade à variação do comprimento de onda, especialmente quando se afasta do espectro de máxima absorção do material genético desse microrganismo. O valor reportado para o comprimento de onda de 260 nm, que é aproximadamente o dobro dos valores para 275 e 280 nm, indica que o pico de absorção do *MS2* está próximo de 260 nm, resultando em maior inativação. Esse valor é comparável ao k de 0,05 cm²/J reportado por Beck et al. (2017) para a LP, reforçando a eficiência dos LEDs operando em 260 nm na inativação do *MS2*.

Rattanakul e Oguma (2018), estudando a inativação do bacteriófago Qβ por LEDs - UV em 265 nm, 280 nm e Lâmpadas de Mercúrio de Baixa Pressão (LP) em 254 nm, reportaram valores de k de 0,08, 0,05 e 0,08 cm²/J, respectivamente. Esses valores indicam que o Qβ apresenta uma maior sensibilidade à radiação UV em comparação com o *MS2*. Além disso, a similaridade entre os valores de k para 265 nm e LP (254 nm) sugere que a inativação de Qβ em 265 nm ocorre com a mesma efetividade que a observada para LP, apesar da diferença na potência de

emissão. Isso demonstra que o Qβ tende a ter um pico de máxima absorção próximo de 265 nm, resultando em uma eficiente inativação a esse comprimento de onda.

Estudos de inativação do HAdV por LEDs - UV com comprimentos de onda de 260 e 280 nm, resultaram em valores de k de 0,03 e 0,04 cm^2/J, respectivamente (BECK et al., 2017). Esses valores indicam que o HAdV é, entre todos os microrganismos estudados, o menos sensível à radiação UV, o que pode dificultar sua inativação quando a UV é o principal método de desinfecção.

Além disso, o HAdV demonstra menor sensibilidade à variação de comprimento de onda, com o valor de k para 260 nm sendo superior ao reportado para 254 nm por Hijnen e Medema (2005), sugerindo que o pico de máxima absorção para o HAdV pode estar entre 260 e 265 nm. Considerando a pequena variação nos valores de k entre os comprimentos de onda de 260 e 280 nm, a utilização do comprimento de onda de 280 nm pode ser vantajosa para a desinfecção do HAdV, levando em conta critérios econômicos e de eficiência de inativação.

De modo geral, considerando os resultados apresentados na Tabela 4.5, pode-se inferir que a ordem de sensibilidade dos microrganismos à radiação segue a sequência: *L. pneumophila* > *φx174* > *E. coli*> T7 (bacteriófagos tipo T) > *B.subtilis* > Qβ > *MS2* > HAdV.

4 METODOLOGIA

4.1 Cultivo e enumeração de microrganismos

A avaliação da eficácia de processos de desinfecção, especialmente os baseados em radiação UV, comumente utiliza *E. coli* (como ATCC 13706 e ATCC 700891) e bacteriófagos MS2 e φX174 (ATCC 13706-B1 e ATCC 15597-B1) como organismos indicadores. Esses microrganismos são amplamente empregados devido à sua facilidade de cultivo, manipulação e monitoramento, além de representarem, de forma geral, a presença de patógenos em ambientes aquáticos. No entanto, estudos recentes têm demonstrado que esses indicadores podem apresentar sensibilidade maior à radiação UV em comparação a certos vírus patogênicos, o que pode levar à superestimação da eficácia dos processos de desinfecção.

Nesse contexto, a inclusão de vírus de relevância clínica e ambiental, como os Adenovírus humanos (HAdV), Herpesvírus simples, SARS-CoV-2 e Vaccinia vírus, configura uma abordagem metodológica mais robusta e realista. Esses vírus apresentam maior resistência a agentes desinfetantes e refletem melhor os desafios enfrentados em sistemas reais de tratamento de água e efluentes. Apesar de exigirem condições laboratoriais mais rigorosas, o uso desses vírus como modelos experimentais permite uma avaliação mais precisa do desempenho microbiológico dos processos, especialmente no que se refere à inativação de patógenos com potencial de causar surtos.

Assim, a comparação entre organismos indicadores tradicionais e vírus patogênicos torna-se fundamental para a validação de tecnologias de desinfecção, contribuindo para o aprimoramento dos critérios de segurança microbiológica e para a proteção efetiva da saúde pública.

4.1.1 E. coli

As culturas hospedeiras de *E. coli* CN-13 (ATCC 13706) e *E. coli* Famp (ATCC 700891), foram inoculadas com alça de platina em tubos contendo 5 mL de caldo triptona (TSB) e incubadas por 16 a 20 horas a 36,5±0,5 ºC para ativação. Após isso, 1,5 mL de cada cultura foi transferido para um frasco contendo 30 mL de TSB e submetido a agitação lenta em agitadora tipo *shaker* por 4 horas a 36,5 ºC, visando a realização de teste de densidade ótica (OD) com culturas em fase log.

Para os testes de OD, alíquotas de 0,1 mL foram adicionadas em 36 tubos de ensaios previamente esterilizados, contendo 10 mL de TSB. A cada 20 minutos, três tubos foram retirados e realizada as leituras da absorbância por espectrofotômetro em comprimento de onda de 600 nm, previamente zerado com cubeta contendo apenas o TSB. Após a leitura da absorbância, foram realizados *spreads* com alíquotas de 0,1 mL de cada tubo em placa de Petri contendo ágar triptona (TSA). As placas foram identificadas e incubadas invertidas a 36,5±0,5 ºC por 24 h em estufa bacteriológica e posteriormente contabilizadas as unidades formadoras de colônia (UFC/mL).

Para a realização dos ensaios de inativação, as cepas, após incubação por 16 a 20 h a 36,5±0,5 ºC, foram incubadas por 140 minutos em TSB até a fase log (concentração variando entre 10^{10} e 10^{11} UFC/mL) (APHA; AWWA; WEF, 2017).

4.1.2 Bacteriófagos

Após o tempo necessário para a obtenção da fase log das culturas de *E.coli*, 1 mL da solução de bacteriófagos (somático *φx174* (ATCC 13706-B1) e F-específico *MS2* (ATCC 15597 – B1)), foi adicionado a tubos contendo 30 mL de TSA, previamente inoculado com as hospedeiras, e armazenados em incubadora tipo *shaker* com rotação de 30 rpm por 4 horas a 36,5±0,5 ºC, para preparo do estoque de bacteriófagos.

Após o período de incubação, a solução foi filtrada em membranas de 0,22 µm tratada com extrato de carne 1,5% com glicina. A solução estoque foi armazenada a 5 ºC até o momento de uso. Da solução estoque, foram realizadas diluições de 10^{-7}, 10^{-8} e 10^{-9} em tubos com TSB. Utilizando a técnica de ágar de dupla camada, 1 mL de cada diluição, em triplicata, foi transferido para um tubo contendo 3 mL de TSA a 45 ºC e 0,1 mL da cultura hospedeira. Após homogeneização, o conteúdo de cada tubo foi vertido sobre placas de Petri contendo TSA e cuidadosamente homogeneizado com movimentos circulares.

As placas foram identificadas e, após a solidificação do ágar, incubadas invertidas por 20 horas a 36,5±0,5 ºC. Posteriormente, foi realizada a contagem de unidades formadoras de placas de lise (UFP/mL), conforme exemplificado na Figura 14. Para realização dos ensaios de inativação, foi utilizada a diluição que forneceu concentração de 10^{8} UFP/mL (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Figura 14 – Placas de lise do bacteriófago MS2

4.1.3 Quantificação Viral de SARS-CoV e Vaccínia Vírus

Os testes de infectividade do SARS-CoV-2 foram conduzidos em uma instalação de alta contenção, nível 4 de biossegurança (OIE BSL-4 – Organização Mundial de Saúde Animal), no Laboratório Federal de Defesa Agropecuária, LFDA-MG, localizado em Pedro Leopoldo, MG, Brasil. Os testes com Vaccínia Vírus foram realizados no Laboratório de Biossegurança, nível 3, do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais.

O SARS-CoV-2 isolado SP02/BRA (SARS.CoV2/SP02.2020.HIAE.Br) foi gentilmente cedido pelo Dr. Edison Luiz Durigon, do Departamento de Microbiologia do Instituto de Ciências Biomédicas da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. O Vaccinia (Vaccinia Vírus VAVC-F13-GFP) foi gentilmente doado pelo Dr. Bernard Moss, do *Laboratory of Viral Diseases, National Institute of Allergy and Infectious Diseases, National Institutes of Health*, Bethesda, Maryland 20892, USA.

Os estoques de vírus foram preparados após a infecção de células Vero CCL-81 e armazenado a - 80 °C até uso posterior em testes de inativação (CASE et al., 2020). Os títulos foram determinados através de um ensaio de placas com 24 poços, semeadas com células Vero CCL-81 a uma concentração de 1×10^6 células/poço. Após atingirem uma confluência de 80-90%, diluições de suspensões virais em Meio Eagle Modificado de Dulbeco com 2% de Soro Fetal Bovino (DMEM-2% FBS) foram transferidas (100 µL/poço) para as placas semeadas. Após 1 hora de adsorção, os poços foram cobertos com uma camada de DMEM-2% FBS contendo 1,2% (p/v) de carboximetilcelulose (CMC). As placas foram então incubadas a 37 °C em 5% de CO_2 por 96 horas, fixadas em uma solução de formol a 10% e coradas com solução de cristal violeta a 0,5%. As unidades formadoras de placa (PFU) foram enumeradas manualmente e registradas como PFU/mL, sendo utilizadas para enumeração amostras contendo de 5 e 50 placas (MAHY, B. M.J; KANGRO, 1996).

4.1.4 Quantificação Viral de Adenovírus Humano Tipo II e Herpes Vírus Simples

Os testes de infectividade viral foram conduzidos no Laboratório de Biossegurança, nível 3, localizado no Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais. O Herpes Vírus Simplex (HSV-1) utilizado no presente estudo foi gentilmente doado pelo Dr. Jonatas Abrahão do Laboratório de Vírus da UFMG, enquanto o Adenovírus Humano Tipo II (HAdV-II) foi generosamente fornecido pelo Dr. Fernando Rosado Spilki da Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

Em resumo, as células Vero CCL-81 foram cultivadas por 24 horas, resultando em aproximadamente 2,0 x 10^7 células/poço em placas de 96 poços. Cem microlitros por poço de uma série de diferentes diluições, realizadas na razão de 10, da suspensão contendo o vírus a ser titulado, foram inoculadas em culturas recém confluídas (n=8), mantendo-se um poço falsamente infectado como controle celular. Após 1 hora de adsorção, com agitação da placa de 96 poços a cada 10 minutos, o inóculo viral foi removido cuidadosamente e substituído por meio DMEM suplementado com 1% de soro fetal bovino. A revelação foi realizada 96 horas pós-infecção, através de observação em microscópio ótico convencional, para determinar a presença ou ausência de efeito citopático (ECP) induzido pelos vírus. A distribuição da presença de efeito citopático em cada diluição foi registrada (n=8 por diluição testada) para o cálculo do título viral. As placas inoculadas também foram analisadas após fixação das culturas com solução de formalina a 10% em PBS 1X e coloração com solução 0.5 % (p/v) de cristal violeta em PBS 1X. A presença de ECP na leitura de monocamadas coradas com cristal violeta foi

interpretada como destruição parcial ou total da monocamada, resultando em perda de coloração (MAHY, B. M.J; KANGRO, 1996).

4.2 Aparato para LED UVC e determinação da Dose

Foram utilizados LEDs UVC (Shenzhen Jiu Zhou Xingh He Technology Co. Ltd, Shenzhen, China) com picos de emissão em 265 nm e 275 nm. O aparato para cada comprimento de onda consistia em uma placa de circuito (4 x 2 cm) com três chips de LED (3,5 x 3,5 mm cada) conectados em série. A luz emitida passava por uma lente de quartzo de 1,8 mm de diâmetro. O sistema incluía driver de LED com *dimmer*, conector USB e fonte de energia, montado em suporte universal posicionado a 2 cm da superfície irradiada.

Como reator, usou-se uma placa de Petri de 9 cm de diâmetro, com 1 cm de profundidade de líquido, equipada com barra magnética em agitador (Figura 1a). Os principais parâmetros elétricos-ópticos dos chips foram: corrente elétrica de 40 mA; tensão de 7,0 V (265 nm) e 6,2 V (275 nm); potência de saída de 4,0 mW (265 nm) e 6,8 mW (275 nm); ângulo de emissão de 120°; pico de emissão de 266,6 nm (Figura 1b) e 276,3 nm (Figura 1c); largura de banda HWL de 10,2 nm (265 nm) e 11,9 nm (275 nm).

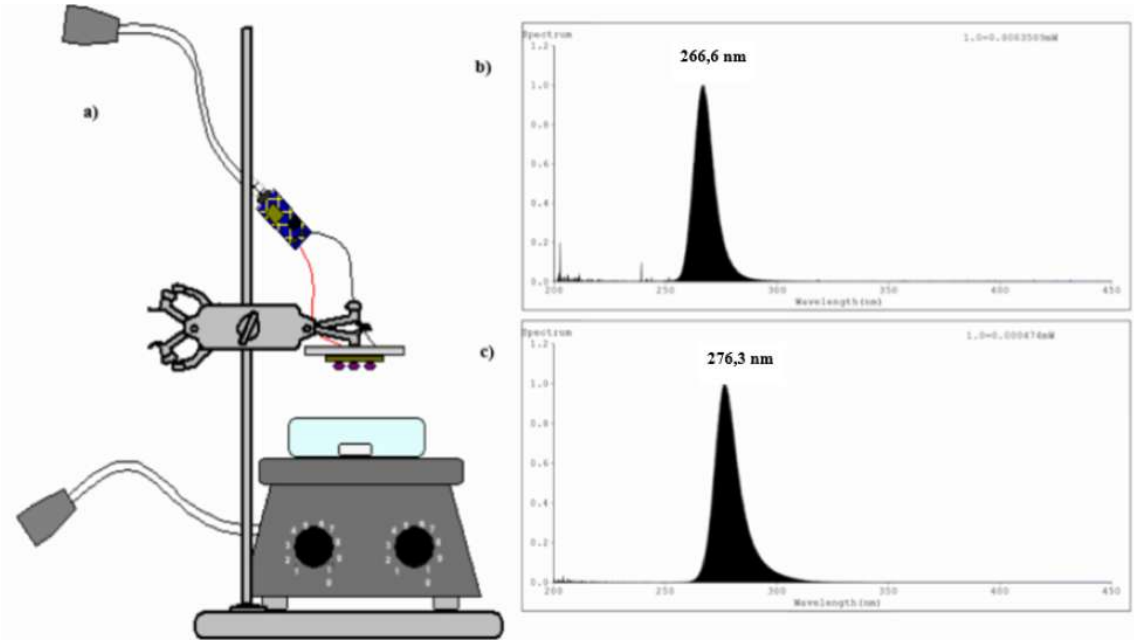


Figura 15 - a) aparato experimental do LED UVC, b) espectro de emissão do LED com pico de 266,6 nm e c) espectro de emissão do LED com pico de 276,3 nm.

O método de actinometria química foi empregado para medir a irradiação UV, utilizando o actinômetro ferrioxalato conforme protocolos estabelecidos e dados de rendimento quântico,

(BOLTON et al., 2011). O actinometro ferrioxalato foi preparado segundo Hatchard e Parker (1956), com rendimento de 40%. A curva de ferro foi determinada pelo método da fenantrolina (APHA; AWWA; WEF, 2017). Os testes tiveram duração máxima de 120 segundos, e a intensidade UV foi calculada pela Equação 25:

$$I = \frac{CxVxhxcxf_d xN_a}{txSx\lambda x\emptyset_{Fe^{+2}}} \quad (25)$$

Onde: I = intensidade média de radiação ($W.cm^{-2}$); C = concentração do íon-ferroso foto-gerado ($mol.L^{-1}$); V= volume da solução de $K_3[Fe(C_2O_4)]3.H_2O$ (L); h = constante de Planck (6,625 x 10^{-34} $J.s^{-1}$); c = velocidade da luz (2,99x10^8 $m.s^{-1}$); f_d = fator de diluição; N_a= constante de Avogadro (6,022 x 10^{23} moléculas.mol^{-1}); t = tempo de exposição (s); S = área do reator (cm^2); λ = comprimento de onda (m) e $ø_{Fe}{}^{+2}$= rendimento quântico ($mol.L^{-1}$).

Todos os testes foram realizados utilizando o mesmo aparato experimental e condições padronizadas. Os LEDs foram ligados 30 segundos antes do início dos testes para permitir o aquecimento, e os testes foram conduzidos à temperatura ambiente em uma sala com luminosidade mínima, garantindo condições controladas. Todos os experimentos foram conduzidos em triplicata para assegurar a robustez e a precisão dos resultados obtidos.

4.3 Procedimento de inativação por LED – UVC

Os testes de inativação foram conduzidos em condições padronizadas, com microrganismos avaliados separadamente sob baixa iluminação e temperatura ambiente. Para *E.coli* e bacteriófagos, utilizaram-se duas matrizes distintas: água bruta (24,9 UNT) e filtrada do rio das Velhas (4,3 UNT). E para os vírus foi utilizada água como matriz. Todos os testes foram realizados em triplicatas

Embora a emissão dos LEDs seja instantânea, cada dispositivo foi acionado 30 segundos antes do início dos testes para estabilização. Durante os testes, a temperatura da matriz foi monitorada antes e durante a exposição, não sendo observadas variações significativas.

Dada a ausência de padronização para testes de desinfecção com LEDs, definiu-se a distância entre LEDs e a superfície do reator, profundidade da lâmina líquida e tempo de exposição, conforme revisão bibliográfica, visando a inativação de 4 logs (SONG; MOHSENI e TAGHIPOUR, 2016).

4.3.1 Procedimento para Bacteriófagos e *E.coli*

O reator consistiu em uma placa de Petri de 9 cm de diâmetro contendo 50 mL da matriz esterilizada, inoculada com cada microrganismo, formando uma lâmina líquida de 1 cm. Uma barra magnética foi adicionada e o conjunto posicionado sobre agitador magnético, mantido ligado durante todo o experimento. Antes do início dos testes de exposição à radiação UV, o agitador magnético foi ligado por 30 segundos para homogeneização das matrizes.

As placas foram expostas à radiação UVC, mantendo 2 cm entre LEDs e superfície do líquido, por até 120 segundos, com coleta de amostra a cada 10 segundos. Em cada intervalo de tempo, retiraram-se 100 µL para *E. coli* e 1 mL para bacteriófagos, para posterior plaqueamento e contagem de UFC/mL e UFP/mL, conforme descrito na seção 4.1.1.

4.3.2 Procedimento para SARS-CoV e Vaccínia Vírus

A avaliação da eficácia dos LEDs - UVC na inativação dos vírus foi realizada através do cálculo da redução da carga viral. Esta redução foi considerada como a diferença entre o título viral obtido antes e após a exposição à radiação UV. Para o cálculo, apenas os poços que apresentaram placas de lise viral não confluentes foram considerados. Os resultados representados em UFP/mL, foram obtidos a partir da Equação 26:

$$\frac{PFU}{t} = \frac{\sum c_1 + c_2 + \dots c_n}{(n_1 + n_2 x v_2 \dots n_n x v_n) x d} \quad (26)$$

Onde: t= é o volume inoculado em cada poço por ponto da diluição seriada em placas de 24 poços; c_1= é o número de UFPs não-confluentes em todas as placas em titulação na primeira diluição da série plausível de leitura; c_2= é o número de UFPs não-confluentes em todas as placas em titulação na segunda diluição da série plausível de leitura; cn= é o número de UFPs não-confluentes em todas as placas em titulação na última diluição da série plausível de leitura (o ponto mais diluído na diluição seriada); n_1= é o número de replicatas correspondentes a c_1; n_2= é o número de replicatas correspondentes a c_2; v_2= é o fator de diluição seriada entre n_1 e n_2; n_n = é número de replicatas correspondentes a c_n; v_n= é o fator de diluição entre n_1/n_n e d: é o fator de diluição de c_1.

As placas foram expostas à radiação UVC, com distância de 2 cm entre os LEDs e a superfície do líquido, por tempo máximo de 300 segundos, com coleta de amostra a cada 15 segundos.

Após cada período de exposição os vírus foram testados quanto à sua infectividade em células Vero CCL-81. Uma alíquota de 50 µL de cada amostra foi coletada e adicionada a 450 µL de DMEM-2% FBS em um tubo de micro centrífuga de 1,5 mL. Controles negativos, compostos por 50 µL de água não inoculada adicionada a 450 µL de DMEM-2% FBS, também foram preparados em cada tempo de irradiação (MAHY, B. M.J; KANGRO, 1996).

4.3.3 Procedimento para HAdV-II e HSV-1

A eficácia dos LEDs - UV na inativação dos vírus foi realizada pelo método $TCID_{50}$. O Teste de Infecção em Cultura de Tecido (TCID50) foi determinado de acordo com o método de Speraman-Karber por meio da Equação 27:

$$m = x_k + (d/2) - d\sum p_i \quad (27)$$

onde: m = logaritmo do título viral em relação ao volume do teste, x_k = o logaritmo da menor dosagem que induz a infecção em todas as culturas; d = o logaritmo do fator de diluição; p_i = a proporção de resultados positivos na diluição i; Σp_i = soma de pi (começando com a diluição mais alta produzindo 100% de infecção)

Os valores foram convertidos para TCID50/ml utilizando um inóculo de amostra de 1,0 mL. O título viral de cada amostra foi determinado com intervalos de confiança de 95% (MAHY, B. M.J; KANGRO, 1996).

4.3.4 Experimentos de reativação para E.coli e Bacteriófago

Para avaliar se os comprimentos de onda utilizados na inativação suprimem a fotorreativação e o reparo no escuro após exposição ao UV, foram realizados testes de recrudescimento baseados no tempo necessário para inativação de 3 a 4 logs dos microrganismos. Após atingir a dose desejada, 2 mL de cada amostra foram coletados para contagem de CFU/mL e PFU/mL. Em seguida, 24 mL de cada amostra foram transferidos para tubos para fotorreativação, e outros 24 mL para tubos cobertos com papel alumínio para reparo no escuro. Os testes foram realizados em temperatura ambiente, seguindo método adaptado de Li et al., (2017).

Para fotorreativação, os tubos ficaram a 30 cm de uma lâmpada fluorescente Philips de 32 W. Para reparo no escuro, os tubos foram incubados em câmara escura. Ambos os testes duraram 3 horas, com coletas em triplicata a cada 20 minutos para contagem de UFC/mL e UFP/mL, conforme descrito na seção 4.1.1.

4.3.5 Determinação do consumo de energia elétrica por log de inativação

Quando se observa um perfil linear entre a dose de fluência de radiação UV e o log de inativação dos microrganismos, o cálculo da Energia Elétrica por Ordem (EEO) pode ser descrito pela Equação 28:

$$E_{EO} = \frac{A}{3{,}6x10^{3}x\ V\ x\ k\ x\ C\ x\ WF} \quad (28)$$

Onde, E_{EO} é consumo de energia elétrica por ordem de magnitude (kWh/m³), A é a área da superfície irradiada (cm²), V é o volume da amostra (mL), k é a taxa constante de inativação (cm²/mJ), WF é o fator de água, 3,6x10^3 é a unidade de conversão das constantes mW para kW, seg por h e mL para m³ e C é a eficiência do plug de energia que pode ser calculado através da equação 29:

$$C = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{F_A}{I_A\ x\ V_A} \quad (29)$$

Onde, $P_{saída}$ é a saída ótica do LED UV (mW), $P_{entrada}$ é a energia aplicada (mW), I_A é a corrente aplicada (mA), V_A é a tensão aplicada (V) e F_A é o fluxo radiante (mW).

De acordo com Beck et al. (2017); Nyangaresi et al. (2018) e Rattanakul e Oguma (2018), essa métrica permite comparar a eficiência de diferentes sistemas de desinfecção, como LP (lâmpadas de mercúrio) ou LED-UV (diodos emissores de luz ultravioleta), com base no consumo de energia elétrica necessário para atingir uma redução específica na concentração de microrganismos na água. Essa análise é importante para otimizar o uso de energia e maximizar a eficácia da desinfecção.

4.3.6 Desenvolvimento de Dispositivo de Inativação

Inicialmente, o aparato foi pensado e desenvolvido para atender o sistema atual de filtração utilizado por comunidades do médio Amazonas. Atualmente, o Instituto Mamirauá fornece para as comunidades um sistema de filtração construído por vela cerâmica montada em dois baldes de 15 litros sobrepostos, onde no primeiro encontra-se a vela e a água bruta ou pré-filtrada e no segundo a água filtrada.

O sistema desenvolvido foi impresso em 3D utilizando o politetrafluoretileno (PTFE) como material, visto o custo, facilidade de aquisição e a reflectância UV de 87 %. O aparato inicial apresentou como medidas um tubo de 6 mm x 57 mm, que era conectado ao interior do balde, seguido por uma câmara de desinfecção retangular de 57 mm x 48 mm, com um canal interno de 6 mm x 5 mm sobreposto pelo vidro der quartzo e uma placa com 3 LEDs em 275 nm. Na

sequência o sistema era interligado a um tubo de 17 mm x 50 mm rosqueado em uma torneira para controle de fluxo, a Figura 16 apresenta o aparato.

Os testes iniciais foram realizados considerando a vazão de 100 mL/min, 250 mL/min, 500 mL/min e 1000 mL/min. Para manter a homogeneidade da amostra no interior do balde, foi realizada agitação lenta através de agitador magnético. Uma vez concluídos os primeiros testes, o sistema foi modificado para inserção de mais uma placa de LED do lado oposto, contando assim com 6 LEDs em 275 nm. Todos os testes iniciais foram feitos com água destilada e inoculação com *E.coli* (ATCC) na concentração de $9x10^3$ UFC/100mL, considerando uma demanda de 2 litros de água por habitante por dia e uma residência padrão composta por 4 habitantes.

Figura 16 – Aparato inicial montado em recipiente de filtração

4.3.6.1 Simulação Numérica

Uma vez finalizados os testes iniciais e analisados os resultados prévios, foram desenhados 3 tipos de dispositivos, sendo um circular, um com chicana vertical e um com chicana horizontal. Para cada dispositivo um modelo tridimensional utilizando Simulação Fluidodinâmica Computacional (CFD), através do *software Ansys* 2024 R1, foi utilizado para simular o perfil de velocidade de escoamento (Figura 17) considerando as vazões de 100 mL/min, 250 mL/min e 450 mL/min.

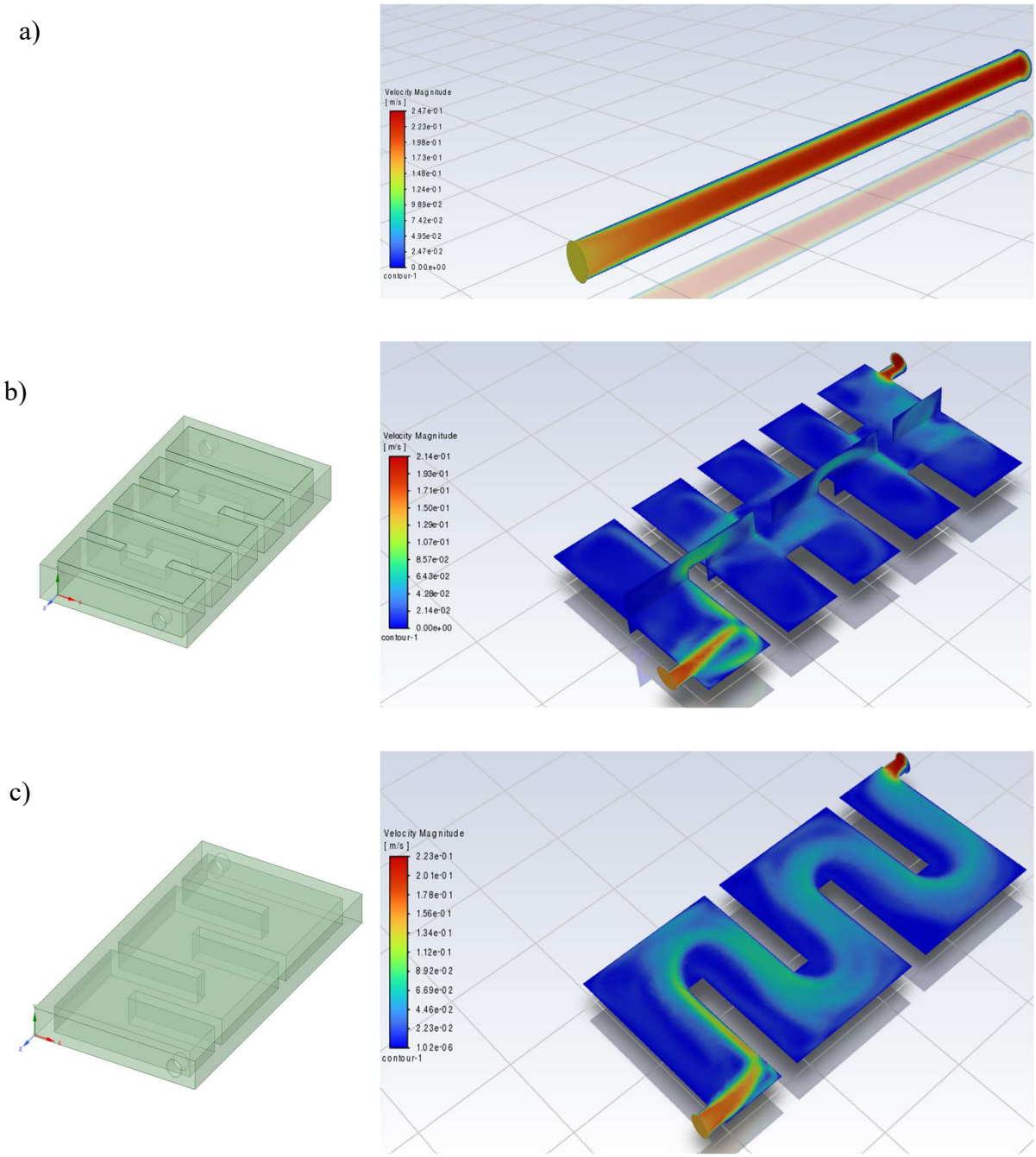


Figura 17 – Perfis de velocidade para vazão de 250 mL/min: a) tubular, b) chicana vertical e c) chicana horizontal

Considerando a menor velocidade de escoamento e a melhor distribuição de fluxo, entre os três dispositivos testados, foi o escolhido para confecção o dispositivo retangular com chicanas horizontais internas. Neste dispositivo, além do perfil de escoamento, foi simulado também o tempo de residência das partículas.

Para o modelo, considerou-se a vazão de entrada e saída e a pressão atmosférica como sendo constante. Além disso, estabeleceu-se como condição de contorno das paredes do reator uma condição estacionária. As condições de escoamento nos aparatos foram analisadas usando o modelo de turbulência k-Ɛ, amplamente empregado em análise CFD pela sua simplicidade e eficiência (MOHAGHEGH MONTAZERI; TAGHIPOUR, 2023; WANG; CHANG; LIN, 2021; WANG; WU; YANG, 2023).

Buscando analisar o possível tempo de contato entre a intensidade UV e os microrganismos, o tempo de residência microbiana durante a passagem pelo aparato foi simulado utilizando a técnica de rastreamento de partícula baseada na segunda lei do movimento de Newton (WANG; WU; YANG, 2023). Para aplicação da técnica cada partícula foi considerada como sendo água, com diâmetro de 0,5 µm e 8000 partículas. Ambas as simulações foram realizadas considerando uma malha de 0,8 mm, 723.089 elementos e 1.93061 nós (Figura 18).

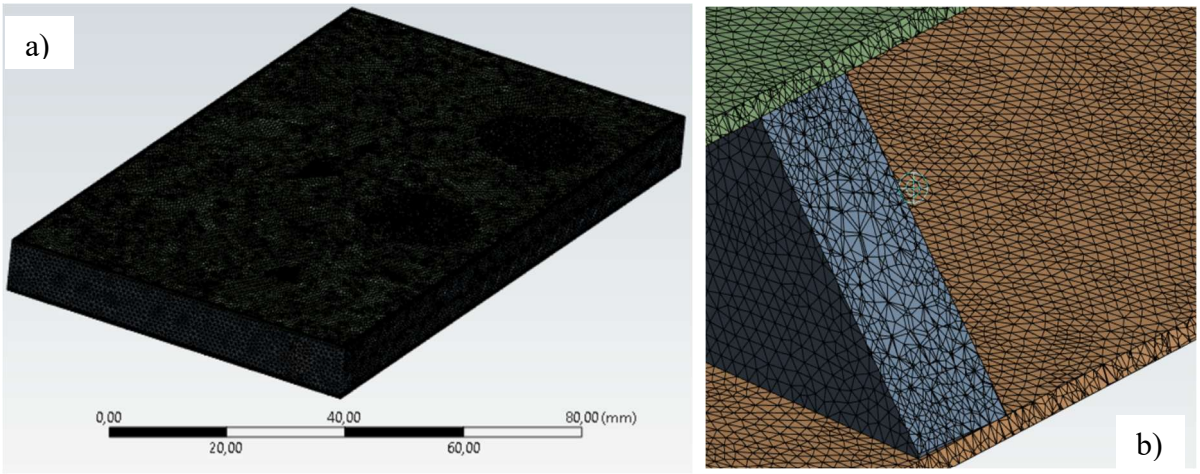


Figura 18 – Detalhes da malha a) externa e b) interna.

4.3.6.2 Validação da Eficiência do Aparato

Partindo da análise prévia da velocidade de escoamento, o dispositivo foi confeccionado no formato retangular com câmaras separadas por chicanas horizontais, tendo altura máxima de 10 mm e diâmetro de entrada e saída de 6 mm, conforme figura 19. Em cada passagem entre câmaras, (chicana), foi disposta uma placa de circuito (3 x 2 cm) soldada com três (3) chips de LED (3,5 x 3,5 mm cada chip) com comprimento de onda de 275 nm, sobreposta em vidro de quartzo com diâmetro de 20 mm e espessura de 5 mm, totalizando 12 LEDs. O dispositivo foi construído em politetrafluoretileno (PTFE) utilizando a impressão 3 D. Os testes de inativação

de microrganismos foram conduzidos em fluxo contínuo com vazão de 100 mL/min, 200 mL/min e máxima de 450 mL/min.

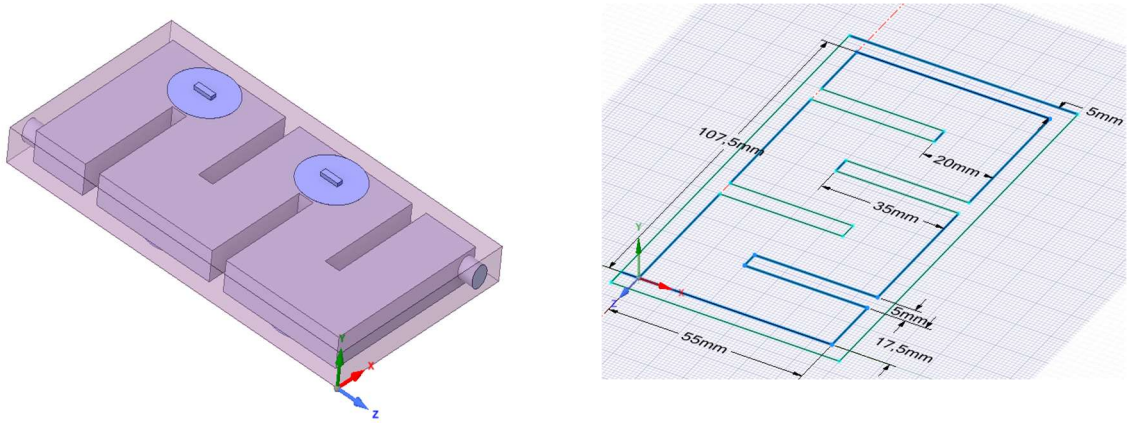


Figura 19 – Esquema do aparato para desinfecção LED-UV

Inicialmente o dispositivo de inativação foi previamente validado quanto a eficiência de inativação para *E. coli* (ATCC). Para tanto, em laboratório o dispositivo foi acoplado a um reservatório com capacidade de 8 litros, previamente esterilizado, preenchido com água destilada e inoculado com os microrganismos na concentração de $9x10^3$ UFC/100mL.

O sistema foi alimentado com as vazões de 100 mL/min, 200 mL/min e 450 mL/min através de uma bomba peristáltica conectada ao aparato e ao reservatório. Os LEDs foram ligados 30 s antes do início dos testes para estabilização da potência de emissão. Em intervalo de tempo de 60 segundos, amostras de 100 mL foram coletadas e retiradas alíquotas de 100 µL para plaqueamento e mensuração de UFC/100 mL, seguindo os passos listados em 4.1.1. Todos os testes foram realizados em triplicata, em ambiente com baixa luminosidade e temperatura ambiente. Além disso, encerrado o tempo de teste 100 ml da amostra foi retirada do reservatório para mensuração de UFC/100 mL com vista ao monitoramento do decaimento natural ou por contaminação cruzada.

4.3.6.3 Eficiência de Inativação para Amostra Real

A determinação de *E. coli* e coliformes totais, para amostras antes e pós inativação com LED-UVC, foram realizadas em ágar cromogênico, utilizando como matriz amostra de água bruta coletada na caixa de equalização da ETA Morro Redondo, Belo Horizonte. O sistema integrado da ETA Morro Redondo realiza o tratamento e distribuição de água para parte de Belo Horizonte e Nova Lima, mediante a captação de água bruta nos Córregos Cercadinho, Mutuca,

Fechos e Minas Mar Azul e Capão Xavier. A água coleta apresentou turbidez entre 0,24 e 0,39 UNT.

As condições de ensaio, tempo e vazão, foram as mesmas descritas em 4.1.6.1. Após a passagem pelo aparato de inativação e coleta de 100 mL, amostras de água foram submetidas a diluições seriadas em solução salina estéril até 10^{-6}. De cada diluição, foram filtrados 100 mL em sistema de filtração a vácuo utilizando membranas de éster de celulose com porosidade de 0,45 µm. As membranas foram transferidas assepticamente para placas contendo meio cromogênico (ágar m-TEC *ChromoSelect* da Sigma Aldrich) e incubadas a 37 °C por 24 horas. O princípio da técnica de plaqueamento em meio cromogênico é baseado na capacidade das enzimas β-D-galactosidase e β-D-glucoronidase produzidas por coliformes e *E. coli*, respectivamente, de hidrolisar as substâncias cromogêneas Salmão-β-D-galactosídeo e X-β-G-glucuronídeo, respectivamente, gerando um composto insolúvel com coloração visível, sem necessidade de uso de lâmpadas para fluorescência do meio, podendo assim ser caracterizado com uma técnica rápida e eficaz para detecção de *E.coli*

Passado o período de incubação, os resultados foram expressos em unidades formadoras de colônia (UFC) por 100 mL, considerando o fator de diluição e diferenciação dos microrganismos, sendo considerado positivo para *E.coli* as colônias com coloração violeta/azul escuro e para coliformes as colônias que apresentarem a coloração vermelha/rosa, conforme exemplificado na Figura 20.

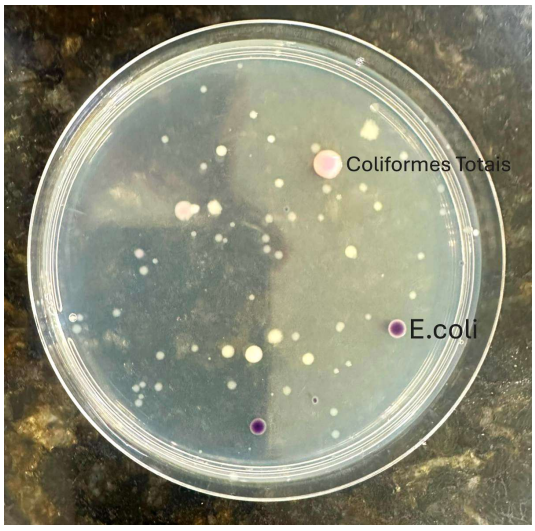


Figura 20 – Exemplo de identificação de microrganismos em ágar cromogênico

4.3.7 Cinética de Inativação e Análise Estatística

Para cada microrganismo e condição experimental, o decaimento microbiano foi analisado em função da dose resposta utilizando três modelos: 1) Log-linear, 2) Weibull e 3) Weibull – tail usando o GInaFit (GEERAERD; VALDRAMIDIS; VAN IMPE, 2005). Esses modelos foram aplicados para descrever a relação entre a dose de radiação UV aplicada e a taxa de inativação dos microrganismos. O uso desses modelos permite entender melhor como a inativação dos microrganismos varia com a dose de radiação, fornecendo *insights* valiosos sobre a eficácia da desinfecção em diferentes condições experimentais. Essa análise é fundamental para otimizar os processos de desinfecção e garantir a segurança microbiológica da água e de outros produtos ou ambientes tratados com radiação UV.

O modelo log-linear assume que há um comportamento linear entre a população de microrganismo e a dose aplicada, podendo ser modelado pela Equação 30:

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = \frac{-k*t}{ln(10)} \quad (30)$$

Onde, N_o e N representam o número de microrganismos antes e após a UV, t o tempo (s) e K a taxa de inativação.

O modelo de Weibull é descrito pela Equação 31 (MAFART et al., 2001):

$$\log10(N) = log10(N_0) - \left(\frac{t}{\beta}\right)^p \quad (31)$$

Onde, N_o e N representam o número de microrganismos antes e após a UV, t o tempo (s), β o tempo para atingir o primeiro log de redução e p a forma da linha. Para p =1 a curva apresenta forma linear, p < 1 resulta em curva concava e p > 1 resulta em curva convexa.

O modelo de Weibull capaz de prever o efeito de cauda em curvas lineares, concavas e convexas é descrito pela Equação 32:

$$logN = log\left[(10^{logN0} - 10^{logNres})\, x\, 10^{\left(\frac{-t}{\beta}\right)^p} + 10^{logNres}\right] \quad (32)$$

Como a equação é derivada da equação 31 os parâmetros são os mesmos, cabendo destacar apenas o parâmetro logNres que representa a densidade populacional residual.

Para analisar o ajuste dos três primeiros modelos utilizados, foram considerados os valores do coeficiente de determinação (R^2) e o erro quadrático médio (MSE). Além disso, para cada modelo, foram determinados o valor da dosagem (mJ/cm²) necessária para inativar quatro logs

de microrganismos (D4, 99,99%) e a constante de taxa de inativação (k) ou o fator de forma (p).

Para avaliar se houve diferenças significativas entre os resultados obtidos para as diferentes matrizes e comprimentos de onda, foi realizado o teste de análise de variância (ANOVA), seguido do teste post hoc de Tukey, utilizando um nível de significância de 5%.

Esse procedimento estatístico possibilita determinar se existem diferenças estatisticamente significantes entre os resultados obtidos para as diferentes condições experimentais, ajudando a identificar quais fatores podem influenciar a eficácia da inativação dos microrganismos pelos diferentes comprimentos de onda e tipos de matriz.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Inativação de Bacteriófagos e *E.coli* por Diodos Emissores de Luz Ultravioleta – LED UVC

As Figuras 21 apresenta os perfis de inativação por LED-UVC para *E. coli* (Famp e CN-13) e os bacteriófagos MS2 e φX174 em água bruta (AB) e água filtrada (AF). Com exceção do MS2, todos os microrganismos mostraram melhor ajuste ao modelo log-linear ($R^2 > 0,95$).

Para *E. coli*, ambos os comprimentos de onda apresentaram bons ajustes e comportamento semelhante, sugerindo relação linear entre o decaimento da concentração microbiana e a dose UV aplicada, conforme o modelo de Chick-Watson. Os LEDs demonstraram desempenho satisfatório, com redução de 4 logs em 30 a 40 segundos, independentemente da matriz e do comprimento de onda. Quanto à inativação dos bacteriófagos, o desempenho foi inferior ao observado para *E. coli*.

A similaridade entre os comprimentos de onda estudados para *E. coli* pode ser explicada pela proximidade das intensidades médias (3,8 W/m² para 265 nm e 3,9 W/m² para 275 nm). Entretanto, o LED de 265 nm apresentou desempenho ligeiramente superior. A mudança da matriz de água bruta para água filtrada reduziu ligeiramente a dose necessária para inativação de 4 logs, sugerindo melhor absorção UV com menor turbidez. Contudo, não houve diferenças significativas entre os comprimentos de onda e matrizes ($p > 0,05$), indicando viabilidade para ambos os comprimentos de onda na inativação.

Ao analisar o modelo de inativação para *E. coli*, observa-se que os valores da constante de taxa (k) para *E. coli* Famp variaram entre 0,51 e 0,70 cm²/mJ, para 265 e 275 nm, respectivamente. Para *E. coli* CN-13, esses valores variaram entre 0,65 e 0,90 cm²/mJ. Esses intervalos (0,51–0,90 cm²/mJ) superam os valores geralmente relatados na literatura para LEDs em diferentes comprimentos de onda (0,18–0,42 cm²/mJ) e para lâmpadas de vapor de mercúrio (0,27–0,50 cm²/mJ) (Hijnen; Medema, 2005; Oguma et al., 2013; Beck et al., 2017; Li et al., 2017; Song; Taghipour; Mohseni, 2019). Isso sugere maior eficiência dos LEDs, resultado dos avanços tecnológicos, indicando potencial crescente para seu uso em inativação microbiana em aplicações residenciais.

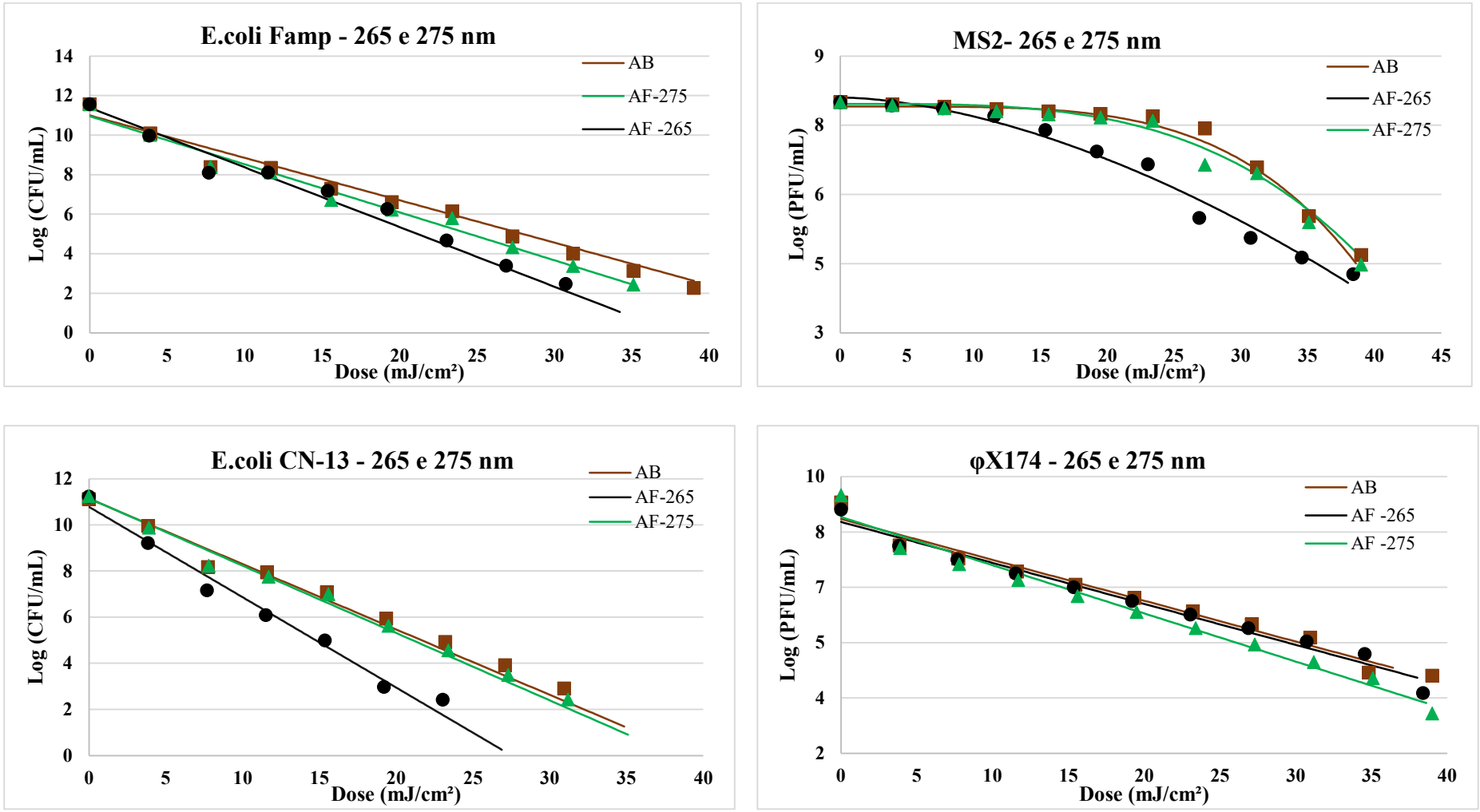


Figura 21 – Modelos de desinfecção dos microrganismos *E. coli* CN-13, *E. coli* Famp e *φx174*, log-lienar. MS2, Weibull. AB (água bruta) e AF (água filtrada)

Os dados indicam leve superioridade do LED em 265 nm, provavelmente devido ao pico de absorção da *E. coli* próximo a esse comprimento de onda (Gates, 1930). Contudo, não houve diferença significativa ($p > 0,05$) em relação ao LED de 275 nm, possivelmente porque a maior absorção por proteínas perto de 280 nm pode causar danos mais intensos às enzimas de reparo (Gates, 1930).

Os valores de k para 265 nm e 275 nm foram superiores aos reportados por Nyangaresi et al. (2018), que registraram 0,42 cm²/mJ para LED a 267 nm e 0,29 cm²/mJ a 275 nm em água deionizada, e superiores aos 0,2 cm²/mJ de Chatterley e Linden (2010) com PBS. Porém, as doses necessárias para 4 logs de remoção nesses estudos (22,5 mJ/cm²) foram maiores que as deste trabalho, que variaram entre 13,48 (água filtrada) e 18,33 mJ/cm² (água bruta) para 265 e 275 nm. Essas diferenças podem refletir o tipo de cultura e avanços tecnológicos nos LEDs.

Bowker et al. (2011) avaliaram a inativação de *E. coli* com LEDs a 255 nm e 275 nm, além de lâmpada de vapor de mercúrio, e observaram perfis de inativação semelhantes entre as três fontes germicidas. Comportamento similar foi identificado neste estudo entre os LEDs de 265 nm e 275 nm. Contudo, Bowker et al. relataram maior inativação em 275 nm comparado a 255 nm, diferindo dos achados desse estudo, onde a inativação a 275 nm foi menor. Essa diferença pode ser explicada pela maior potência de saída dos LEDs no estudo citado, resultando em maior irradiância em menor tempo. Além disso, a dose mínima relatada para o LED de 275 nm foi 9 mJ/cm², inferior aos 13,48 mJ/cm² encontrados aqui. As discrepâncias refletem diferenças nas condições experimentais e nas características dos LEDs.

Oguma et al. (2013) relataram dose de 10,8 mJ/cm² para inativação de 4 logs de *E. coli* em PBS a 265 nm, com $k = 0,43$ cm²/mJ, e dose de 13,8 mJ/cm² a 280 nm ($k = 0,29$ cm²/mJ). Esses valores diferem dos relatados por Chatterley e Linden (2010), Bowker et al. (2011) e do presente estudo, que apresentou maiores constantes de inativação e doses. As variações podem ser atribuídas às diferentes condições experimentais, à falta de padronização em ensaios com LEDs e à variabilidade genética entre espécies do mesmo gênero, afetando a resposta à radiação UV.

Os valores de k a 265 nm observados neste estudo estão alinhados com os relatados em estudos recentes, como os de Rattanakul e Oguma (2018) e Song e Mohseni (2019), que apresentaram k de 0,80 cm²/mJ e 0,42 cm²/mJ, respectivamente. Entretanto, as doses reportadas nesses

estudos (6 e 8,2 mJ/cm²) são inferiores às encontradas neste trabalho. Ademais, os valores de k deste estudo superam os apresentados por Chatterley e Linden (2010) e Oguma et al. (2013).

Apesar das diferenças, especialmente nos valores de dose, destaca-se que o desempenho dos LEDs na inativação de *E. coli* foi superior ao das lâmpadas de mercúrio, cuja constante de inativação varia entre 0,27 e 0,50 cm²/mJ. Beck et al. (2017) e Li et al. (2017) compararam LEDs a 260 nm e 280 nm com lâmpadas de baixa e média pressão (LP e MP), encontrando valores de k de 0,28 e 0,43 cm²/mJ (260 nm) e 0,30 e 0,31 cm²/mJ (280 nm), superiores aos 0,27 cm²/mJ das lâmpadas, indicando maior eficiência na redução logarítmica. Não foram observados efeitos sinérgicos ao combinar os comprimentos de onda, nem diferenças estatísticas entre os desempenhos, evidenciando a viabilidade de LEDs entre 275 e 280 nm para inativação microbiana.

Em relação aos bacteriófagos, seu uso em processos de desinfecção e monitoramento de qualidade da água é promissor devido à facilidade de cultivo e resistência comparável a vírus patogênicos, como adenovírus, e oocistos de protozoários, como *Cryptosporidium parvum*. Conforme observado na Figura 2, os bacteriófagos mostraram menor sensibilidade à radiação UV em comparação com *E. coli*, reforçando seu potencial como indicadores de controle da qualidade da água. O bacteriófago MS2 apresentou ajuste superior ao modelo de Weibull, indicando resistência inicial maior e subsequente declínio progressivo da população, provavelmente decorrente dos danos acumulados causados pela radiação UV.

Os coeficientes de inativação para os comprimentos de onda de 265 nm e 275 nm não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$), o que não era esperado, especialmente na comparação entre os bacteriófagos. Conforme concluído por Floripes e Mota Filho (2024), após ampla revisão bibliográfica, o bacteriófago φX174 tende a apresentar menor resistência à radiação UV em relação a algumas espécies de *E. coli* e ao bacteriófago MS2.

O perfil observado para o φX174, em comparação ao MS2, confirma sua maior sensibilidade à radiação UV, conforme relatado por Aoyagi et al. (2011) e Kim, Kim e Kang (2017). Considerando que o MS2 possui pico de absorção próximo a 260 nm e baixa sensibilidade à radiação UV, esperava-se desempenho superior do LED a 265 nm na inativação, quando comparado com 275 nm (Mamane-Gravetz et al., 2005).

Apesar da menor eficiência na inativação dos bacteriófagos, os resultados indicam que LEDs operando em 265 nm e 275 nm podem ser eficazes. A viabilidade do uso de LEDs a 275 nm é

reforçada pela maior dose, eficiência quântica superior e menor custo de aquisição, tornando-os adequados para sistemas de desinfecção.

As constantes de inativação obtidas para o φX174 nos comprimentos de onda de 265 nm e 275 nm, variando entre 0,25 e 0,30 cm²/mJ, apresentaram comportamento semelhante ao relatado por Aoyagi et al. (2011), que observaram valores de 0,38 cm²/mJ (255 nm) e 0,30 cm²/mJ (280 nm), com doses de 9 e 10 mJ/cm², respectivamente. No presente estudo, as doses foram superiores (36,1 e 37,44 mJ/cm²), embora se confirme a menor sensibilidade do φX174 em comparação a fagos como MS2 e Qβ.

As constantes de inativação obtidas para o MS2, de 0,08 e 0,11 cm²/mJ para 265 nm e 275 nm, respectivamente, foram superiores às relatadas por Bowker et al. (2011) e Beck et al. (2017), cujos valores variaram entre 0,035 e 0,066 cm²/mJ em diferentes comprimentos de onda (255, 260, 275 e 280 nm). Também foram superiores aos valores usuais para lâmpadas de baixa e média pressão (0,061 e 0,056 cm²/mJ, respectivamente). Tais resultados indicam maior resistência do MS2 à inativação, corroborando sua reconhecida menor sensibilidade à radiação UV em comparação com fagos como φX174, T7 e Qβ.

Contudo, conforme destacado por Rattanakul e Oguma (2018), a seleção de LEDs-UV com base apenas nas constantes de inativação pode levar a interpretações equivocadas. Assim, a eficiência energética torna-se um fator determinante na escolha econômica desses dispositivos. Nesse contexto, a Tabela 12 apresenta os valores de Consumo de Energia Elétrica para Inativação de 4 logs (EE_4) para todos os microrganismos avaliados neste estudo, considerando os diferentes comprimentos de onda.

Tabela 12 – Consumo de energia para inativação de 4 logs (kWh/m³), para os microrganismos *E. coli* Famp, CN-13, MS2 e φx174, água bruta (AB) e água filtrada (AF).

Consumo de Energia (kWh/m³)								
λ (nm)	**AB**				**AF**			
	Famp	CN-13	MS2	φX174	Famp	CN-13	MS2	φX174
265	0,24	0,19	6,67	0,49	0,18	0,14	4,75	0,48
275					0,11	0,09	3,08	0,21

De acordo com os valores apresentados na Tabela 12, observou-se menor consumo de energia para atingir a inativação de 4 logs de *E. coli* e φX174 em ambos os comprimentos de onda. Esse resultado pode estar associado a uma leve melhora no desempenho dos LEDs, possivelmente

devido a danos induzidos ao DNA. Ainda assim, os valores indicaram desempenho ligeiramente superior para 275 nm, sugerindo sua viabilidade para aplicações de desinfecção. É possível que esse comprimento de onda cause danos mais relevantes às enzimas de reparo e apresente maior absorção pelas proteínas associadas ao material genético

Em relação ao MS2, destaca-se que o maior consumo energético para inativação já era previsto, considerando sua reconhecida resistência à radiação UV. Com base na tarifa de energia elétrica vigente em Minas Gerais para bandeira vermelha residencial (2025) e na dose necessária para a remoção de 4 logs (99,99%), os custos estimados foram de aproximadamente R$ 0,21/m³ para Famp em água bruta, e de R$ 0,19 e R$ 0,12/m³ para água filtrada a 265 e 275 nm, respectivamente. Para a cepa CN-13, os valores estimados foram de R$ 0,21/m³ em água bruta, e de R$ 0,15 e R$ 0,10/m³ em água filtrada a 265 e 275 nm. Por outro lado, os custos para inativação dos bacteriófagos MS2 foram consideravelmente mais elevados, variando de R$ 7,21/m³ (água bruta) a R$ 3,33/m³ (água filtrada) em 275 nm, evidenciando sua menor sensibilidade à radiação UV.

Os valores apresentados na Tabela 12 estão em consonância com os reportados por Rattanakul e Oguma (2018) para o consumo energético necessário à inativação de 3 logs de *E. coli*. Ressalta-se, contudo, o melhor desempenho obtido no presente estudo para a inativação de 4 logs, frente aos valores de 0,41 e 0,17 kWh/m³ indicados pelos autores para os comprimentos de onda de 265 nm e 280 nm, respectivamente. Assim como no estudo mencionado, os valores obtidos neste trabalho foram superiores aos reportados para lâmpadas de baixa pressão (LP), que apresentaram consumo de 0,0099 kWh/m³. Apesar do menor consumo energético das LPs, destaca-se que essas lâmpadas possuem maior potência de saída e, consequentemente, desempenho quântico superior aos LEDs.

Para a inativação do bacteriófago MS2, os valores de consumo energético apresentados na Tabela 12 estão em conformidade com os reportados por Beck et al. (2017). Os autores indicaram consumo da ordem de 2,074 e 2,106 kWh/m³ para a redução de 2 logs, nos comprimentos de onda de 260 nm e 280 nm, respectivamente. Foi observado, ainda, consumo significativamente inferior ao utilizar lâmpadas de baixa e média pressão (LP e MP), com valores de 0,028 kWh/m³ e 0,060 kWh/m³.

Com o objetivo de verificar a efetividade dos LEDs na inativação de *E. coli* e dos bacteriófagos MS2 e φx174, foram realizados testes de fotorreativação e reativação no escuro, a fim de avaliar

a taxa de sobrevivência após a exposição. No entanto, não foi observado recrescimento dos microrganismos em nenhum dos tratamentos, indicando a efetividade dos LEDs na inativação microbiológica em amostras de água bruta e filtrada.

5.2 Inativação de SARS-CoV-2, Herpes Humano Simples, Vaccínia Vírus e Adenovírus Humano Tipo II em Água Usando LED-UVC

Conforme ilustrado na Figura 22, os dados obtidos demonstraram melhor ajuste ao modelo Weibull-Tail, o que indica uma dinâmica de inativação distinta daquela geralmente observada para bactérias, as quais costumam apresentar comportamento linear frente à exposição à radiação UV. Esse resultado sugere uma maior resistência dos vírus quando submetidos à radiação emitida por LEDs operando nos comprimentos de onda de 265 nm e 275 nm. Observou-se, particularmente, uma rápida redução inicial da fração mais sensível da população de adenovírus humano (HAdV) em doses baixas, seguida por uma aparente persistência da fração mais resistente, caracterizando um padrão de decaimento não linear típico de sistemas heterogêneos.

Observa-se, na Figura 22, uma redução de 4 logs de $TCID_{50}$/mL com doses de radiação de 24,19 mJ/cm² para LEDs operando a 265 nm e 25,74 mJ/cm² para 275 nm. Esses valores são significativamente inferiores aos obtidos pelo modelo de ajuste log-linear, que indicaram a necessidade de doses de 76,03 mJ/cm² e 79,56 mJ/cm², respectivamente, para alcançar a mesma taxa de inativação. Especificamente para o comprimento de onda de 265 nm, o comportamento observado ao se aplicar um modelo de primeira ordem é compatível com os resultados descritos por Keshavarzfathy et al. (2021). Nesse estudo, os autores reportaram uma dose de 74,4 mJ/cm² necessária para uma redução de 1,6 logs de adenovírus em um reator de fluxo contínuo operando a 1 L/min. Ademais, foi verificado que o sistema com LEDs apresentou desempenho 1,23 vezes superior ao sistema com lâmpadas de baixa pressão (LP), o que sugere uma potencial redução de até 23% na dose requerida para alcançar níveis semelhantes de inativação.

No estudo conduzido por Beck et al. (2017), utilizando LEDs com pico de emissão em 260 nm, foi necessária uma dose de 137,9 mJ/cm² para alcançar uma redução de 4 logs de HAdV-II. Em trabalho anterior, os mesmos autores (Beck et al., 2014) relataram doses de 140,2 mJ/cm² para inativação equivalente, utilizando laser com comprimento de onda de 260 nm, e de 172 mJ/cm² quando empregadas lâmpadas de baixa pressão (LP). Em contraste, o presente estudo demonstrou que uma dose de apenas 24,19 mJ/cm², com LEDs operando a 265 nm, foi suficiente para inativar 4 logs de HAdV-II. Esse resultado indica uma eficácia

significativamente superior em comparação com outras fontes de radiação UV, tanto tradicionais quanto não tradicionais, mesmo aquelas com picos de emissão próximos a 265 nm. Tal desempenho reforça o potencial do uso de LEDs UV-C como uma alternativa eficiente e energeticamente vantajosa para a desinfecção viral.

Para atingir uma redução de 4 logs de HAdV-II com LED operando a 275 nm, foi necessária uma dose de 25,74 mJ/cm². Esse valor é significativamente inferior ao reportado por Beck et al. (2017) que relataram a necessidade de 148,1 mJ/cm² para a mesma taxa de inativação utilizando LED com pico em 280 nm. Também é inferior às doses descritas por Beck et al. (2014) ao empregar laser com comprimentos de onda de 270 nm e 280 nm, que demandaram 92 mJ/cm² e 120 mJ/cm², respectivamente. Além disso, o desempenho observado no presente estudo supera o de fontes tradicionais, como as lâmpadas de baixa pressão (LP UV), cujas doses foram relatadas como 138 mJ/cm² (Nwachuku et al., 2005) e 160 mJ/cm² (Baxter et al., 2007), e até mesmo o de sistemas de média pressão (MP UV), com dose de 60 mJ/cm² para a mesma redução (Linden et al., 2007). Esses resultados evidenciam a elevada eficiência do LED UV operando a 275 nm na inativação do HAdV-II, posicionando-o como uma alternativa promissora frente às tecnologias convencionais de desinfecção.

Cabe destacar que, ao comparar a eficiência de inativação dos LEDs operando a 265 nm e 275 nm, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os dois comprimentos de onda, considerando um nível de significância de 5%. Esse resultado está em consonância com os achados de Beck et al. (2017), que também não identificaram variações expressivas de desempenho entre faixas espectrais próximas. Um aspecto adicional relevante observado neste estudo é o comportamento não log-linear da curva de inativação, o que sugere a existência de uma subpopulação de partículas virais de HAdV-II mais resistentes à radiação UV nos comprimentos de onda avaliados. Apesar disso, tal comportamento não comprometeu a eficácia do processo, uma vez que foram alcançadas reduções superiores a 4 logs com doses consideravelmente inferiores às reportadas por Saguti et al. (2022), que indicaram a necessidade de doses entre 600 e 1000 mJ/cm² para obter inativação semelhante em sistemas comerciais baseados em lâmpadas de mercúrio.

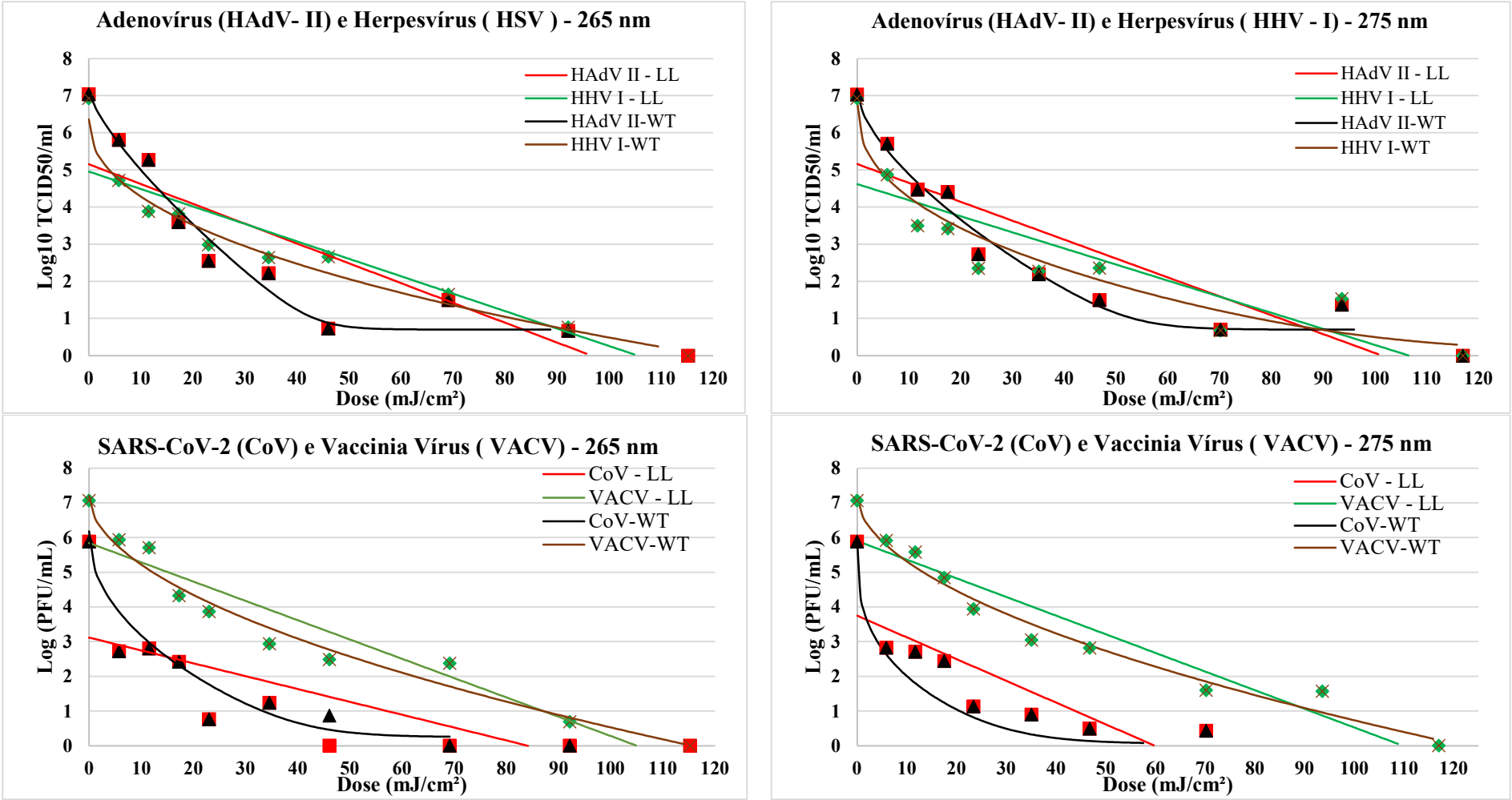


Figura 22 - Modelos de desinfecção para Adenovírus, Herpes vírus Humano, SARS-COV-2 e *Vaccinia* vírus. LL (Log-Linear) e WT (Weibull-Tail)

Embora os resultados obtidos para a inativação do HAdV-II tenham sido satisfatórios, é fundamental considerar que esse sorotipo está entre os mais sensíveis à radiação UV. Estudos apontam que a eficácia da desinfecção por UV pode variar substancialmente entre os diferentes sorotipos de adenovírus. Por exemplo, o HAdV-41 tem sido identificado como um dos mais resistentes, exigindo mais que o dobro da dose necessária para inativação quando comparado ao HAdV-II em sistemas com lâmpadas de baixa pressão (LP-UV) (AUGSBURGER et al., 2021).

De acordo com Oguma; Rattanakul (2021), o adenovírus humano 40 é o sorotipo mais resistente à radiação UV em 254 nm, seguido pelos sorotipos 41, 5, 2 e 1, respectivamente. Independentemente das diferenças entre sorotipos, os adenovírus humanos, de forma geral, apresentam resistência superior à de outros vírus de DNA veiculados por água. Esse aspecto destaca a importância de considerar a variabilidade intraespécie na formulação de estratégias de desinfecção, uma vez que a adoção de doses baseadas em sorotipos mais sensíveis pode não garantir a inativação adequada de sorotipos mais resistentes. Assim, para assegurar a eficácia microbiológica dos sistemas UV, é recomendável que testes incluam sorotipos representativos da diversidade de resistência dentro do grupo HAdV.

Em comparação com os valores obtidos neste estudo, a literatura reporta doses consideravelmente mais elevadas para a inativação de 4 logs de diferentes sorotipos de adenovírus. Para o HAdV-I, por exemplo, foi necessária uma dose de 138 mJ/cm² utilizando lâmpadas de baixa pressão (LP). No caso do HAdV-V, a dose requerida foi ainda maior, alcançando 200 mJ/cm². Quando utilizado LED-UV com comprimento de onda de 285 nm, a inativação de 4 logs demandou uma dose de 173,9 mJ/cm². Em relação aos sorotipos mais resistentes, a inativação do HAdV-40 exigiu uma dose de 235,3 mJ/cm² com LP, enquanto para o HAdV-41 a dose requerida foi de 222,2 mJ/cm² (BECK et al., 2017; NWACHUKU et al., 2005; OGUMA; RATTANAKUL, 2021; OGUMA; RATTANAKUL; BOLTON, 2016; RATTANAKUL; OGUMA, 2021).

Embora os sorotipos V, 41 e 40 apresentem maior resistência à radiação UV, os valores de dose para inativação determinados neste estudo foram significativamente inferiores aos relatados para lâmpadas de mercúrio e LEDs UV convencionais, indicando que os sorotipos de HAdV avaliados — inclusive o HAdV-I — apresentam menor resistência frente à tecnologia LED

utilizada nos comprimentos de onda de 265 nm e 275 nm. Essa constatação destaca a superioridade da tecnologia LED em termos de eficiência na inativação viral, o que pode se traduzir em vantagens práticas como redução do consumo energético e diminuição da exposição a radiações mais intensas.

Adicionalmente, a análise baseada no modelo log-linear tradicional sugere que o HAdV-II demandaria doses mais elevadas para completa inativação, ainda que inferiores às necessárias para os demais sorotipos estudados. Esse comportamento ressalta a importância de considerar a heterogeneidade na resposta viral ao planejar estratégias de desinfecção, visando assegurar um controle microbiológico eficaz em diferentes cenários operacionais.

O ajuste dos dados referentes à inativação do vírus Herpes *Simplex* (HSV) indicou uma leve superioridade do modelo log-linear para o comprimento de onda de 265 nm, em comparação com os resultados obtidos para o adenovírus humano (HAdV), apesar do pico de absorção do HSV situar-se próximo à faixa de 260–265 nm. Para alcançar uma redução de 4 logs na população viral do HSV, foram necessárias doses de 31 mJ/cm² e 29 mJ/cm² para os comprimentos de onda de 265 nm e 275 nm, respectivamente. A menor resistência observada para o comprimento de onda de 275 nm pode estar associada ao pico de absorção do DNA do HSV, que ocorre entre 270 e 280 nm, potencialmente provocando danos mais severos ao material genético. Entretanto, não foi identificada diferença estatisticamente significativa nas taxas de inativação entre os dois comprimentos de onda avaliados.

Em contraste, Bui et al. (2022) relataram resultados distintos em um estudo com LEDs UVC operando nos comprimentos de onda de 260 nm e 280 nm, nos quais foram necessárias doses de 50 mJ/cm² e 90 mJ/cm², respectivamente, para alcançar uma redução de 4 logs na população viral. Os autores destacaram que a taxa de formação de subprodutos, como dímeros de pirimidina ciclobutano (CPDs) e 6-4 fotoprodutos pirimidínicos (6-PPs), não apresentou diferença significativa entre os dois comprimentos de onda avaliados. Esses achados corroboram o potencial da tecnologia LED para a inativação eficiente do vírus Herpes Simplex.

Os eventos recentes desencadeados pela pandemia da COVID-19, declarada em março de 2020, renovaram a atenção dos setores de saúde para a importância da vigilância e do monitoramento contínuo de possíveis novas doenças e endemias emergentes, dado o rápido avanço global do SARS-CoV-2, potencialmente facilitado pela mobilidade internacional acelerada na era

contemporânea. Agora, passado o período da pandemia, surge uma nova preocupação com o aumento das notificações de *Monkeypox* (mpox), conhecida popularmente como varíola dos macacos em países não endêmicos, como o Brasil, onde até 30 de janeiro de 2024 foram registradas 57.333 notificações, incluindo 11.212 casos confirmados e 16 mortes associadas a complicações da doença(SAÚDE, 2024).

Conforme Koutras; Wade (2022), a mpox é uma zoonose viral rara causada pelo vírus da varíola símia, pertencente ao gênero *Orthopoxvirus*, da família *Poxviridae*. Embora endêmica na África Central e Ocidental, a mpox emergiu recentemente nos Estados Unidos, motivando a declaração de emergência em saúde pública e gerando preocupação internacional. Os vírus da família *Poxviridae* constituem um grupo diverso de grandes vírus de DNA de fita dupla que se replicam exclusivamente no citoplasma das células infectadas. O membro mais conhecido do gênero *Orthopoxvirus* é o vírus da varíola, já erradicado, enquanto outro representante notável é o vírus vaccínia, utilizado na campanha de erradicação da varíola para induzir resposta imune protetora. Esses vírus compartilham semelhanças em tamanho, morfologia, mecanismo de replicação e estrutura.

Apesar de não haver relatos documentados de transmissão hídrica do vírus Vaccinia (VACV) para humanos, estudos indicam sua capacidade de persistir em ambientes aquáticos. Mahnel; Ottis; Herlyn (1977) observaram que o VACV pode permanecer viável por mais de 200 dias em água tratada e em corpos d'água como rios e lagos a 9°C, com uma concentração inicial de 10^4 unidades infecciosas por mililitro.

Por outro lado, a utilização de microrganismos indicadores, como o Vaccinia vírus (VACV), em pesquisas relacionadas a patógenos pode trazer benefícios significativos, tais como a redução do risco de contágio e a melhor compreensão do comportamento desses organismos em diferentes contextos experimentais. Nesse sentido, considerando a detecção do vírus *Monkeypox* (mpox) em águas residuárias, que podem eventualmente ser descarregadas em corpos hídricos superficiais, e a estabilidade ambiental ainda pouco compreendida desse vírus (Ariana, 2016; Atoui et al., 2023; Tiwari et al., 2023), o uso do VACV como substituto para estudos de inativação em água apresenta-se como uma ferramenta valiosa para a vigilância sanitária e a proteção da saúde pública.

No presente estudo, assim como observado para os demais vírus de DNA analisados, o Vaccinia vírus (VACV) apresentou melhor ajuste ao modelo de Weibull-Tail, embora o modelo log-linear também tenha apresentado ajuste razoável. Para alcançar a inativação de 4 logs do VACV, foram necessárias doses de 38,02 mJ/cm² e 40,95 mJ/cm² para os comprimentos de onda de 265 nm e 275 nm, respectivamente. Essas doses são superiores aos valores reportados na literatura, que indicam doses tão baixas quanto 0,3 mJ/cm² para inativação de 1 a 2 logs, obtidas com o uso de seis lâmpadas de baixa pressão (LP) (MCDEVITT et al., 2007). A discrepância entre os resultados pode ser explicada pelo maior número de lâmpadas de LP utilizadas, proporcionando maior potência e área de exposição em comparação aos sistemas baseados em LEDs.

No entanto, os resultados obtidos neste estudo estão alinhados com os dados apresentados po Koutras; Wade (2022), que relataram a inativação superior a 4 logs do VACV em menos de 7 minutos utilizando lâmpadas de baixa pressão (LP). No presente trabalho, a mesma taxa de inativação foi atingida em aproximadamente 120 segundos. Ressalta-se ainda que não houve diferença estatisticamente significativa entre os comprimentos de onda testados (265 nm e 275 nm), o que evidencia a eficácia do sistema LED-UVC na inativação do VACV e sugere seu potencial para aplicação também frente ao vírus mpox.

De acordo com Tran et al. (2021), a presença de coronavírus em ambientes aquáticos pode ser influenciada por diversos fatores, como a temperatura da água, a concentração de sólidos suspensos e matéria orgânica, o pH do meio e a dose de desinfetante aplicada. Esses parâmetros são determinantes para a sobrevivência e persistência viral nesses ambientes. No entanto, conforme orientações da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2020), os processos de desinfecção atualmente empregados são eficazes na inativação da maioria dos microrganismos patogênicos presentes na água, incluindo o SARS-CoV, que se mostra particularmente sensível a desinfetantes à base de cloro. Tais evidências reforçam a importância da manutenção dos padrões de potabilidade da água como medida essencial para a proteção da saúde pública.

No presente estudo, a inativação de 4 logs do SARS-CoV-2 utilizando LEDs emissores de radiação UVC nos comprimentos de onda de 265 nm e 275 nm foi alcançada com doses de 23 mJ/cm² e 19 mJ/cm², respectivamente. Observou-se que a cinética de desinfecção não seguiu o modelo log-linear tradicional, o que pode indicar a presença de subpopulações virais com maior

resistência à radiação ou a formação de agregados durante o processo de exposição. Ademais, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os dois comprimentos de onda avaliados, reforçando a elevada sensibilidade do SARS-CoV-2 à radiação UV em geral. Esses achados sugerem que a tecnologia LED-UVC, independentemente do comprimento de onda entre 265 e 275 nm, representa uma estratégia eficaz e promissora para a desinfecção de superfícies e ambientes contaminados por esse vírus.

Os valores de dose encontrados neste estudo estão alinhados com os resultados relatados por Inagaki et al. (2020), que observaram uma redução de 4 logs do SARS-CoV-2 com doses a partir de 37,5 mJ/cm² utilizando LEDs de 280 nm, sem a presença de efeitos citopáticos em células inoculadas com o vírus após a irradiação. Outros estudos também corroboram esses achados: Shimoda et al., (2021) utilizaram LEDs em 265 nm e 280 nm, reportando doses de 4,5 mJ/cm² e 8,2 mJ/cm², respectivamente, para inativação de 3 logs. Ma et al. (2021), observaram inativações equivalentes com doses de 3 mJ/cm² e 6 mJ/cm² em comprimentos de onda de 270 nm e 282 nm. De forma semelhante, Minamikawa et al. (2021) relataram doses de 1,8 mJ/cm² e 3 mJ/cm² para 3 logs de redução, utilizando LEDs de 265 nm e 280 nm. Por fim, Biasins et al., (2022) descreveram a completa inibição viral com dose de apenas 4 mJ/cm² a 278 nm. Esses resultados reforçam a eficácia da tecnologia LED-UVC na inativação do SARS-CoV-2 em diferentes faixas do espectro UVC.

Maquart; Marlet (2022), em estudo sobre a inativação do SARS-CoV-2 utilizando LEDs de 265 nm, relataram que, para superfícies plásticas, foram necessárias doses entre 3,2 e 44,7 mJ/cm² para alcançar uma redução de 4 logs. Em outras superfícies, como aço, tecido, papel e papelão, as doses para inativação variaram de 22,35 mJ/cm² a 89,4 mJ/cm², com reduções de 3,8 ± 0; 4,2 ± 0,9; 2,9 ± 1,6 e 3,3 ± 1,4 logs, respectivamente. Nos mesmos experimentos, utilizando lâmpadas de mercúrio de baixa pressão (LP), foram requeridas doses entre 7,14 e 48,8 mJ/cm², e entre 46,43 e 185,7 mJ/cm², dependendo da superfície. Apesar das menores doses obtidas com os LEDs em algumas condições, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as duas fontes de radiação UV, indicando que os LEDs apresentam eficiência comparável às lâmpadas de mercúrio na inativação do SARS-CoV-2 em diferentes superfícies.

É importante ressaltar que as diferenças observadas entre os estudos podem estar associadas a diversos fatores, como as condições experimentais, as especificidades de fabricação dos LEDs, a metodologia empregada na quantificação da dose de radiação UV e o tipo de microrganismo utilizado nos ensaios. Mesmo um mesmo microrganismo pode apresentar variações na sensibilidade a um determinado comprimento de onda, o que reforça a importância de uma abordagem criteriosa e padronizada na avaliação da eficácia da radiação UV para a inativação de patógenos.

No contexto das infecções por coronavírus, atualmente são conhecidos sete tipos capazes de infectar seres humanos. Dentre eles, o SARS-CoV-2, o SARS-CoV e o MERS-CoV são associados a quadros clínicos mais graves e a surtos epidêmicos, enquanto os HCoV-OC43, HKU1, HCoV-NL63 e HCoV-229E estão geralmente relacionados a infecções respiratórias leves, como resfriados comuns (NISHIOKA, 2021). Devido à menor patogenicidade desses últimos, eles têm sido considerados como modelos substitutos ao SARS-CoV-2 em experimentos laboratoriais, uma vez que compartilham características estruturais e funcionais relevantes, permitindo a avaliação de estratégias de controle com menor risco biológico.

Boegel et al. (2021) relataram que doses de 2,2 mJ/cm² e 6,8 mJ/cm² foram suficientes para inativar 4 logs de HCoV-229E e HCoV-OC43, respectivamente, usando UV a 254 nm. Esses valores, especialmente para o HCoV-229E, são inferiores aos de Ma et al. (2021b) que reportaram 11,5 mJ/cm² (270 nm) e 14,8 mJ/cm² (282 nm). Para o HCoV-OC43, os achados de Boegel são compatíveis com os de Gerchman et al. (2020), que observaram doses de até 16,4 mJ/cm² em diferentes comprimentos de onda. Comparado ao SARS-CoV-2, esses vírus mostraram maior sensibilidade ao UV, indicando variação na resistência mesmo entre vírus da mesma família. Assim, o uso de HCoV-229E e HCoV-OC43 como substitutos experimentais do SARS-CoV-2 é uma alternativa segura e viável.

Entre os vírus analisados, o SARS-CoV-2 apresentou menor sensibilidade à radiação UV em comparação ao Vaccinia vírus (VACV), enquanto o HHV demonstrou maior resistência que o HAdV em ambos os comprimentos de onda. É importante destacar que as metodologias de quantificação viral utilizadas diferem entre os grupos: HAdV e HSV foram quantificados em Log10 TCID50/mL, enquanto SARS-CoV-2 e VACV foram avaliados em PFU/mL. Essa diferença pode influenciar a interpretação direta das taxas de inativação, uma vez que PFU e

TCID50 refletem conceitos próximos, mas não idênticos, de infectividade viral. Apesar dessa limitação, a análise de variância (ANOVA) com teste post hoc de Tukey revelou diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) somente entre as taxas de inativação do VACV e do SARS-CoV-2. As variações observadas podem ser atribuídas a características estruturais e genéticas dos vírus, como tipo e conformação do material genético, presença ou ausência de envelope viral, além do tamanho e formato viral. A Tabela 13 apresenta as principais informações dos vírus estudados.

Conforme os dados apresentados na Tabela 13, esperava-se que o HAdV apresentasse maior resistência à radiação UV em ambos os comprimentos de onda, devido à ausência de envelope proteico, característica que geralmente confere maior resistência à inativação viral. Além disso, o HAdV é reconhecido como um dos vírus de DNA de fita dupla (ds-DNA) mais resistentes à radiação UV, especialmente quando comparado a outros vírus entéricos (AUGSBURGER et al., 2021).

A menor sensibilidade observada para o Vaccinia vírus (VACV) pode estar associada à formação de agregados virais, fenômeno conhecido por reduzir a eficácia da radiação UV ao limitar a penetração da radiação em partículas internas protegidas no interior dos aglomerados. Além disso, diferenças no tamanho do genoma viral podem influenciar a resistência à inativação: genomas maiores, como o do VACV, podem sofrer menor impacto relativo da radiação UV, uma vez que a mesma quantidade de danos representa uma fração menor do total de nucleotídeos, o que contribui para sua maior resistência em comparação ao Herpesvírus humano (HHV). É importante ressaltar que a eficácia da inativação também depende da capacidade de reparo do DNA viral após o dano induzido. Adicionalmente, embora ambos os vírus sejam DNA de fita dupla (dsDNA) e envelopados, diferenças na composição e estrutura do envelope e do capsídeo podem afetar a sensibilidade à radiação UV, influenciando a proteção do material genético e, consequentemente, a eficiência do processo de inativação (OGUMA; RATTANAKUL, 2021).

Tabela 13 – Resumo das principais características dos vírus estudados

Família	Tipo de ácido nucleico	Conformação do ácido nucleico, tamanho do genoma	Morfologia	Tamanho (nm)
Adenoviridae	ds-DNA	Linear, 35-36 Kb	Não envelopado, icosaédrico	90
Poxviridae	ds-DNA	Linear, 130 – 375 Kb	Envelopado, bloco ou ovoide	220 - 450
Herpesviridae	ds-DNA	Linear, 152 Kb	Envelopado, esférico a pleomórfico	150 – 200
Coronaviridae	ss-RNA (+)	Linear, 27-32 Kb	Envelopado, esférico	120

Fonte: (HULO et al., 2011)

Em relação ao SARS-CoV-2, a menor dose necessária para sua inativação pode estar relacionada ao tamanho reduzido do seu genoma, que é aproximadamente cinco vezes menor do que o do Vaccinia vírus (VACV), potencialmente resultando em maior absorção da radiação UV pelos nucleotídeos. Outra possível explicação é o tipo de ácido nucleico presente no vírus: vírus de RNA fita simples (ssRNA) geralmente apresentam maior sensibilidade à radiação UV em comparação com vírus de RNA fita dupla (dsRNA) e vírus de DNA, devido à menor capacidade de reparo do material genético (AUGSBURGER et al., 2021).

Possivelmente, essa diferença está relacionada à maior estabilidade estrutural proporcionada pela fita dupla do ácido nucleico, devido às ligações de hidrogênio que estabilizam a hélice. Essa estabilidade pode resultar em menor absorção da radiação UV, o que explica as doses mais elevadas necessárias para a inativação de vírus entéricos com genoma de DNA ou RNA de fita dupla em ambientes aquáticos (BATTIGELLI; SOBSEY; LOBE, 1993; SAGUTI et al., 2022).

Em comparação às doses necessárias para inativação dos vírus dsDNA avaliados neste estudo, Woo et al. (2019) reportaram doses de LED de 260 nm entre 16 e 26 mJ/cm² e de LED de 280 nm entre 19 e 30 mJ/cm² para a inativação de 4 logs de *Coxsackievírus* A, *Echovírus* 30, Poliovírus 1 e Enterovírus 70, todos pertencentes à família *Picornaviridae*. Esses vírus são não envelopados, esféricos, com tamanho aproximado de 30 nm, possuem RNA de fita simples positiva (ssRNA+), e genomas lineares variando entre 7,1 e 8,9 Kb (HULO et al., 2011).

Observa-se que as doses relatadas são inferiores às encontradas neste estudo para a inativação de vírus dsDNA, corroborando as observações de Battigelli; Sobsey; Lobe, (1993) e Saguti et

al. (2022) sobre a maior resistência dos vírus dsDNA à radiação UV. Esses resultados ressaltam a eficácia da tecnologia LED-UV na inativação de vírus patogênicos e potencialmente patogênicos.

5.3 Sistema de Desinfecção por LED - UVC para Inativação de patógenos em água de consumo em locais desprovidos de sistema tradicionais de abastecimento de água

Os testes iniciais do primeiro aparato foram realizados com vazões de 100 mL/min e 200 mL/min. Em ambas as condições, o dispositivo mostrou baixa eficiência na inativação de *E. coli*, alcançando no máximo 0,5 log UFC/100 mL. Essa baixa eficiência foi atribuída principalmente à baixa potência de emissão dos LEDs. Para melhorar o desempenho, o aparelho foi modificado com a instalação de uma segunda placa contendo três LEDs no lado oposto da primeira, totalizando seis LEDs.

Apesar da modificação, os testes nas mesmas vazões apresentaram apenas leve melhora, com inativação máxima de 1 log UFC/100 mL. Além da baixa intensidade da radiação, a ineficiência do sistema pode estar associada à ocorrência de curto-circuito hidráulico, devido à geometria irregular das seções internas do aparelho. O controle da vazão, feito por regulagem manual da torneira, não garantiu escoamento constante, possivelmente gerando zonas de turbulência que reduziram o contato efetivo da radiação UV com os microrganismos, comprometendo a eficiência do processo.

Diante dessas limitações e considerando que a meta era alcançar ausência de *E. coli* em 100 mL, novos modelos foram testados em relação à velocidade do escoamento. O modelo com chicana horizontal foi selecionado para impressão, por apresentar menor velocidade de fluxo e facilidade de reprodução. Para correlacionar intensidade da radiação UV e tempo de exposição, o dispositivo foi projetado considerando a velocidade do escoamento e o tempo de residência das partículas nas vazões de 100, 200 e 450 mL/min.

A Figura 23 apresenta os resultados da simulação da velocidade e do tempo de detenção hidráulica no aparelho. Conforme esperado, a redução da vazão aumenta o tempo de residência e melhora o padrão de escoamento, favorecendo a inativação dos microrganismos, já que a dose necessária é proporcional ao tempo de exposição à radiação UV.

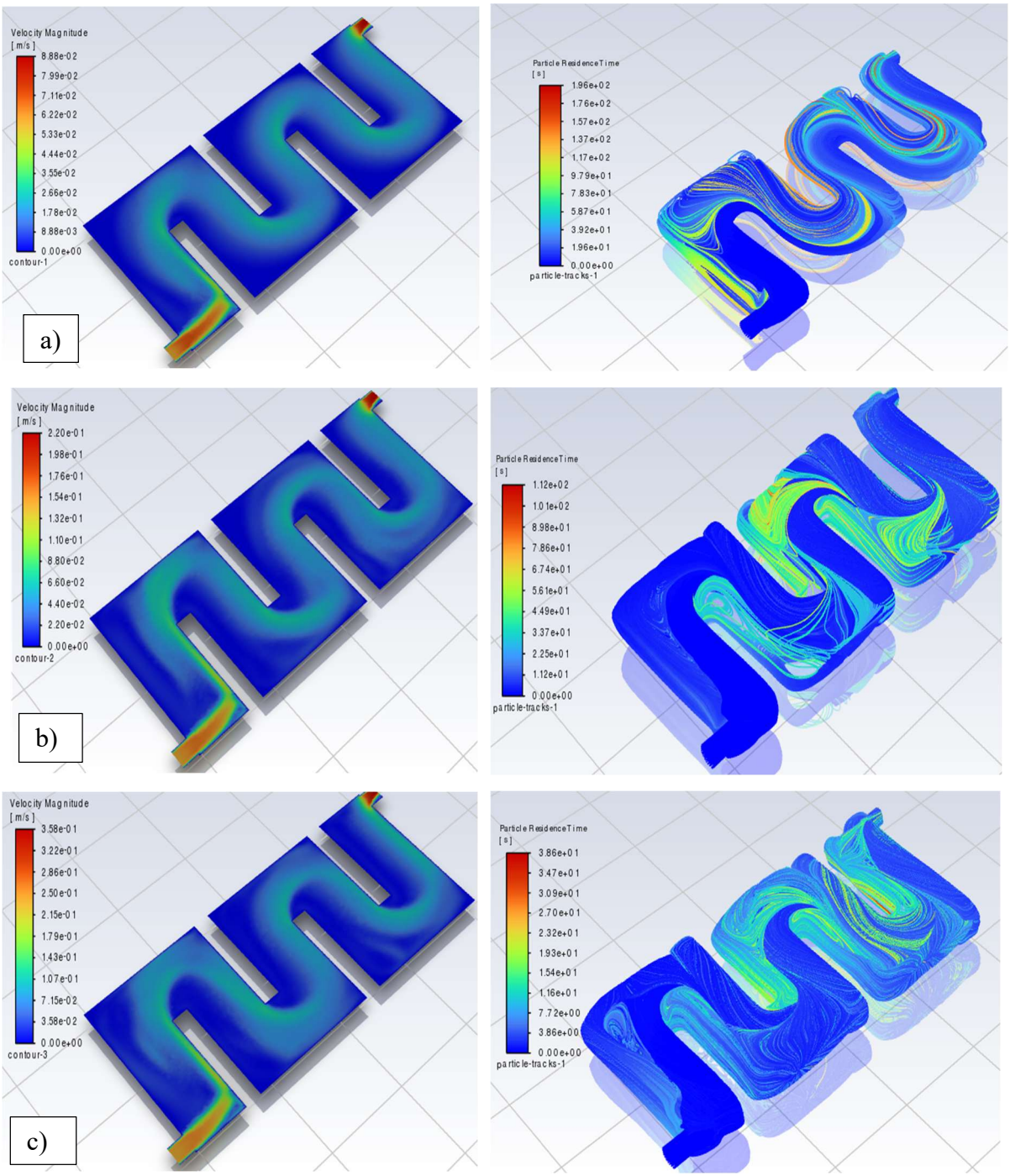


Figura 23 – Velocidade de escoamento e Tempo de residência das partículas no interior do aparato: a) 100 mL/min, b) 200 mL/min e c) 450 mL/min.

Como pode ser observado na figura, a vazão de 100 mL/min resultou em tempo médio de detenção variando entre 19 s e 58 s, correspondendo a doses de radiação UV entre 7,4 mJ/cm² e 22,6 mJ/cm². Já para a vazão de 250 mL/min, o tempo de detenção variou entre 11 s e 33 s,

com doses entre 4,29 mJ/cm² e 12,8 mJ/cm². Por fim, a vazão de 450 mL/min apresentou tempos de detenção entre 3,86 s e 11,6 s, resultando em doses de 1,5 mJ/cm² a 4,5 mJ/cm².

Kang et al., (2024), observaram comportamento semelhante, verificando que o aumento da vazão de 1 L/min para 2 L/min reduziu o tempo de permanência das partículas, resultando em diminuição da dose UV de 231,2 mJ/cm² para 61,2 mJ/cm², respectivamente.

No contexto de um aparelho equipado com LEDs de baixa intensidade de emissão, em comparação com lâmpadas de mercúrio, o controle e a definição de uma vazão mínima são essenciais para garantir a ausência de *E. coli* em 100 mL de água. O aumento da vazão exigiria a instalação de um maior número de LEDs, elevando os custos de fabricação. Isso se deve ao fato de que, diferentemente das lâmpadas de mercúrio, que emitem radiação ao longo de um tubo circular, os LEDs possuem emissão pontual, o que limita a área irradiada.

A Figura 24 apresenta os resultados da inativação para *E. coli* cepa ATCC em água potável, além de *E.coli* e Coliformes Totais em amostra de água bruta bruta, respectivamente.

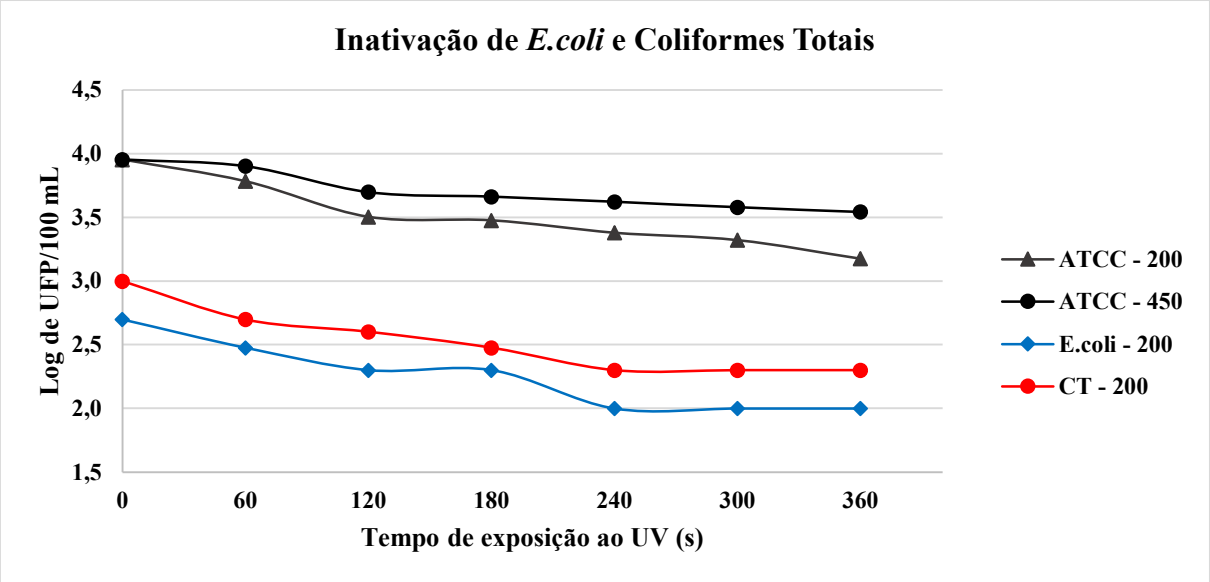


Figura 24 – Inativação de *E.coli* e Coliformes Totais (CT) no aparato. *E.coli* = cepa ambiental, ATCC = cepas de *E.coli* ATCC, 200 = vazão em mL/min e 400 = vazão em mL/min

Em relação à Figura 24, destaca-se que, para a vazão de 100 mL/min, não foi observado crescimento de *E. coli* após 60 segundos de passagem pelo reator em todas as amostras coletadas. Além disso, não houve diferença significativa entre a concentração inicial de

microrganismos (4 logs UFC/100 mL) e a concentração da amostra controle ao final do experimento.

Por outro lado, considerando a Figura 24, com o aumento da vazão, as eficiências de remoção reduziram-se drasticamente. Para 250 mL/min, a eficiência mínima observada no início da operação foi de 33%, alcançando até aproximadamente 83% ao final do teste. Com vazão de 450 mL/min, a eficiência variou entre 11% e 61%. Esses resultados indicam que, para vazões elevadas, o sistema não atende ao padrão de potabilidade que exige ausência de *E. coli* em 100 mL para consumo humano. Entretanto, para vazões baixas, como 100 mL/min, o sistema demonstrou capacidade de inativar totalmente os microrganismos presentes.

Comportamento semelhante foi reportado por Wang; Chang; Lin (2021), que estudaram um reator circular equipado com 24 LEDs de 285 nm. Os autores observaram que a inativação logarítmica diminuiu drasticamente ao aumentar a vazão de 40 mL/min para 60 mL/min. No primeiro cenário, foi alcançada uma remoção de 4 logs em 15,6 segundos, enquanto no segundo a eficiência de inativação foi significativamente menor. Além disso, foi destacado que o aumento da potência dos LEDs melhora a eficiência do processo; entretanto, tal incremento pode acarretar maior consumo energético e aumento nos custos de aquisição e fabricação, representando uma desvantagem relevante.

Wang et al. (2023), ao investigarem aparatos com configurações serpentina, espiral, grelha, espinha de peixe e grelha modificada, com dimensões de 100 mm × 100 mm × 10 mm e largura de canal de 5 mm, irradiados por 16 LEDs de 273 nm, observaram que a eficiência de inativação diminuiu com o aumento da vazão, entre 120 mL/min e 160 mL/min, em todas as configurações. Embora o tempo de residência das partículas tenha sido semelhante nas configurações serpentina e espiral, a taxa de inativação foi superior na configuração espiral. Isso foi atribuído à maior mistura promovida pelas curvas do canal em formato de serpentina, que favorecem uma distribuição mais homogênea da radiação UV, resultando em inativação total de 3,8 logs na configuração espiral, contra 3,2 logs na serpentina.

Considerando que a dose de inativação de 4 logs para *E. coli* é próxima a 14,74 mJ/cm², o desempenho satisfatório observado para a vazão de 100 mL/min pode ser atribuído ao tempo de residência adequado das partículas, permitindo a aplicação dessa dose. Entretanto, para

vazões superiores (250 mL/min e 450 mL/min), o tempo de residência é insuficiente para garantir essa dose, resultando em baixa eficiência de inativação.

Esses achados ressaltam a importância do controle rigoroso da vazão para assegurar a eficácia do processo de desinfecção, especialmente em sistemas que utilizam LEDs com potência limitada. Além disso, evidenciam a necessidade de otimização do design do aparato para maximizar o tempo de exposição dos microrganismos à radiação UV, seja por meio da adoção de configurações que promovam melhor distribuição da radiação ou do aumento do número de LEDs, sempre considerando o equilíbrio entre eficiência, consumo energético e custo de fabricação.

No que tange aos custos envolvidos, o aparato desenvolvido apresentou um custo total de R$ 178,48, distribuído entre R$ 100,96 para aquisição das quatro placas de LEDs, R$ 68,52 para os vidros de quartzo e R$ 9,00 referentes ao consumo de energia elétrica e materiais para produção. O custo por hora de operação é competitivo em relação a aparatos comerciais, que tipicamente custam cerca de R$ 120, mas contam com maior número de LEDs, o que pode conferir maior robustez ao processo de inativação. Considerando a vazão de tratamento de 100 mL/min, o consumo energético estimado é de aproximadamente 1,27 kWh/m³, resultando em um custo operacional aproximado de R$ 1,37 por metro cúbico tratado.

Embora o custo total do aparato desenvolvido seja competitivo em comparação com sistemas comerciais, a eficiência do processo de inativação ainda depende fortemente do controle da vazão e da otimização do design para maximizar o tempo de exposição à radiação UV. O desafio reside em equilibrar a redução dos custos, evitando o aumento excessivo do número de LEDs, com a necessidade de garantir doses UV suficientes para a desinfecção eficaz da água.

Dessa forma, melhorias no projeto, como a adoção de configurações que promovam maior homogeneidade na distribuição da radiação (exemplo: canais em espiral ou serpentina) e o controle preciso da vazão, podem elevar a eficiência do sistema sem aumentar significativamente os custos operacionais. Isso reforça a importância de um design integrado que considere não apenas aspectos técnicos de desinfecção, mas também o custo-benefício para aplicação prática em engenharia sanitária.

6 CONCLUSÕES

A tecnologia de desinfecção de água por Diodo Emissor de Luz Ultravioleta (LED-UVC), que tem avançado rapidamente na última década, demonstrou eficácia na inativação de microrganismos, apresentando eficiência comparável às lâmpadas de baixa pressão (LP) e média pressão (MP) de vapor de mercúrio. Esta tecnologia é promissora devido a diversas vantagens, como a ausência de mercúrio, menor consumo energético, facilidade de integração a sistemas de tratamento existentes, possibilidade de uso com energia solar — possibilitando aplicações pontuais e móveis — e emissão em comprimentos de onda específicos.

Entretanto, a sensibilidade dos microrganismos varia conforme o comprimento de onda, o que pode representar uma limitação. A variabilidade nos resultados evidencia a necessidade de padronização dos protocolos para determinação da dose UV dos LEDs e dos ensaios de inativação. Atualmente, estudos apresentam dados baseados em dose ou tempo de inativação, dificultando a comparação direta. Além disso, a diversidade de metodologias para quantificação da dose UV, como o uso de radiômetros ou actinometria química, pode afetar as constantes de inativação (k). A combinação de LEDs com diferentes comprimentos de onda não tem demonstrado efeitos sinérgicos significativos até o momento.

Nos resultados obtidos, destaca-se que os LEDs não foram eficazes na inativação dos bacteriófagos MS2 e φx174, evidenciando a limitação do uso da *E. coli* como microrganismo indicador para processos de desinfecção de água. A resistência desses bacteriófagos sugere a necessidade de métodos de monitoramento mais rigorosos, dada sua similaridade com a resistência do *Cryptosporidium*. A ordem de sensibilidade à radiação UV dos microrganismos testados seguiu a relação: *E. coli* CN-13, *E. coli* Famp < φx174 = MS2.

Os dados indicam que os LEDs podem inativar vírus de interesse em saúde pública com doses comparáveis às reportadas para lâmpadas de mercúrio. Surpreendentemente, o adenovírus humano (HAdV) demonstrou maior sensibilidade à radiação UV em comparação a outros vírus, considerando a mesma metodologia de quantificação, embora suas doses de inativação tenham sido superiores às necessárias para bactérias do grupo *E. coli* e enterococos. Esses achados ressaltam a complexidade da resposta viral à radiação UV e a importância de considerar múltiplos fatores ao avaliar a eficácia do processo.

Nos testes laboratoriais, o aparato desenvolvido apresentou boa eficiência para vazões baixas, como 100 mL/min. Contudo, o aumento da vazão reduziu significativamente a eficiência da inativação, devido à diminuição do tempo de residência dos microrganismos nas câmaras de desinfecção. Para manter a eficiência em vazões maiores, possivelmente será necessário aumentar o número de LEDs, elevando a intensidade da radiação UV nas câmaras. Apesar da ausência de crescimento de *E. coli* para vazão de 100 mL/min, recomenda-se o uso de cloro residual para garantir a qualidade microbiológica, especialmente diante da possibilidade de recontaminação.

Em síntese, as diferenças observadas entre este estudo e outros podem ser atribuídas a variações nas características construtivas dos LEDs, aos tipos de microrganismos utilizados e, principalmente, à falta de padronização dos protocolos de inativação. Entretanto, a modularidade dos LEDs, a possibilidade de operação em comprimentos de onda específicos e a eficiente conversão quântica de energia elétrica tornam esta tecnologia uma ferramenta promissora para a desinfecção de água. Tal potencial é especialmente relevante para sistemas descentralizados e locais sem acesso a redes públicas de abastecimento, principalmente quando combinada com fontes renováveis, como a energia

7 REFERÊNCIAS

AOYAGI, Yoshinobu; TAKEUCHI, Misaichi; YOSHIDA, Kaoru; KUROUCHI, Masahito; YASUI, Nobuhito; KAMIKO, Naoyuki; ARAKI, Tutomu; NANISHI, Yasushi. Inactivation of Bacterial Viruses in Water Using Deep Ultraviolet Semiconductor Light-Emitting Diode. **Journal of Environmental Engineering**, *[S. l.]*, v. 137, n. 12, p. 1215–1218, 2011. DOI: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000442.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington. DOI: 10.1016/B978-0-12-382165-2.00237-3.

ATOUI, Ali; JOURDAIN, Frédéric; MOULY, Damien; CORDEVANT, Christophe; CHESNOT, Thierry; GASSILLOUD, Benoît. A review on mpox (monkeypox) virus shedding in wastewater and its persistence evaluation in environmental samples. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, *[S. l.]*, v. 7, n. February, 2023. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100315.

AUGSBURGER, Nicolas; RACHMADI, Andri Taruna; ZAOURI, Noor; LEE, Yunho; HONG, Pei Ying. Recent Update on UV Disinfection to Fulfill the Disinfection Credit Value for Enteric Viruses in Water. **Environmental Science and Technology**, *[S. l.]*, v. 55, n. 24, p. 16283–16298, 2021. DOI: 10.1021/acs.est.1c03092.

BATTIGELLI, D. A.; SOBSEY, M. D.; LOBE, D. C. The Inactivation of Hepatitis a Virus and other Model Viruses by UV Irradiation. **Water Science & Technology**, *[S. l.]*, v. 27, p. 339–342, 1993.

BAXTER, Carole S.; HOFMANN, Ron; TEMPLETON, Michael R.; BROWN, Martha; ANDREWS, Robert C. Inactivation of Adenovirus Types 2, 5, and 41 in Drinking Water by UV Light, Free Chlorine, and Monochloramine. **Journal of Environmental Engineering**, *[S. l.]*, v. 133, n. 1, p. 95–103, 2007. DOI: 10.1061/(asce)0733-9372(2007)133:1(95).

BECK, Sara E.; RODRIGUEZ, Roberto A.; LINDEN, Karl G.; HARGY, Thomas M.; LARASON, Thomas C.; WRIGHT, Harold B. Wavelength dependent UV inactivation and DNA damage of adenovirus as measured by cell culture infectivity and long range quantitative PCR. **Environmental Science and Technology**, *[S. l.]*, v. 48, n. 1, p. 591–598, 2014. DOI: 10.1021/es403850b.

BECK, Sara E.; RYU, Hodon; BOCZEK, Laura A.; CASHDOLLAR, Jennifer L.; JEANIS,

Kaitlyn M.; ROSENBLUM, James S.; LAWAL, Oliver R.; LINDEN, Karl G. Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-wavelength synergy. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 109, p. 207–216, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2016.11.024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.024.

BIASIN, Mara et al. UV and violet light can Neutralize SARS-CoV-2 Infectivity. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, *[S. l.]*, v. 10, n. January, p. 100107, 2022. DOI: 10.1016/j.jpap.2021.100107. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100107.

BOEGEL, S. J. et al. Robust Evaluation of Ultraviolet-C Sensitivity for SARS-CoV-2 and Surrogate Coronaviruses. **Microbiology Spectrum**, *[S. l.]*, v. 9, n. 2, 2021. DOI: 10.1128/spectrum.00537-21.

BOLTON, J. R.; COTTON, Ch. A. **The Ultraviolet Disinfection Handbook**. [s.l: s.n.].

BOLTON, James R.; STEFAN, Mihaela I.; SHAW, Ping Shine; LYKKE, Keith R. Determination of the quantum yields of the potassium ferrioxalate and potassium iodide-iodate actinometers and a method for the calibration of radiometer detectors. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, *[S. l.]*, v. 222, n. 1, p. 166–169, 2011. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2011.05.017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.05.017.

BOWKER, Colleen; SAIN, Amanda; SHATALOV, Max; DUCOSTE, Joel. Microbial UV fluence-response assessment using a novel UV-LED collimated beam system. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 45, n. 5, p. 2011–2019, 2011. DOI: 10.1016/j.watres.2010.12.005. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.005.

BUI, Thi Kim Ngan; MAWATARI, Kazuaki; EMOTO, Takahiro; FUKUSHIMA, Shiho; SHIMOHATA, Takaaki; UEBANSO, Takashi; AKUTAGAWA, Masatake; KINOUCHI, Yohsuke; TAKAHASHI, Akira. UV-LED irradiation reduces the infectivity of herpes simplex virus type 1 by targeting different viral components depending on the peak wavelength. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, *[S. l.]*, v. 228, n. January, p. 112410, 2022. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2022.112410. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112410.

CASE, James Brett; BAILEY, Adam L.; DIAMOND, Michael S.; KIM, Arthur S.; CHEN, Rita E. Growth, detection, quantification, and inactivation of SARS-CoV-2. **Virology**, *[S. l.]*,

n. January, 2020.

CHATTERLEY, Christie; LINDEN, Karl. Demonstration and evaluation of germicidal UV-LEDs for point-of-use water disinfection. **Journal of Water and Health**, *[S. l.]*, v. 8, n. 3, p. 479–486, 2010. DOI: 10.2166/wh.2010.124.

CHEN, Jian; LOEB, Stephanie; KIM, Jae Hong. LED revolution: Fundamentals and prospects for UV disinfection applications. **Environmental Science: Water Research and Technology**, *[S. l.]*, v. 3, n. 2, p. 188–202, 2017. DOI: 10.1039/c6ew00241b.

CHEVREMONT, A. C.; FARNET, A. M.; COULOMB, B.; BOUDENNE, J. L. Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters. **Science of the Total Environment**, *[S. l.]*, v. 426, p. 304–310, 2012. a. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.043. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.043.

CHEVREMONT, A. C.; FARNET, A. M.; SERGENT, M.; COULOMB, B.; BOUDENNE, J. L. Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs. **Desalination**, *[S. l.]*, v. 285, p. 219–225, 2012. b. DOI: 10.1016/j.desal.2011.10.006. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.006.

CHOI, Sung Kuk; KIM, Sung Wook; PARK, Dae Won; KIL, Gyung Suk; CHOI, Chul Young. Disinfection of phytoplankton by application of UV LED. **Proceedings of the 2nd International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering, MN '09**, *[S. l.]*, p. 87–91, 2009.

DANIEL, Luiz Antônio.; BRANDÃO, Cristina Célia Silveira; GUIMARÃES, José Roberto; LIBÂNIO, Marcelo; DE LUCA, Sérgio João. Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável. **Abes**, *[S. l.]*, p. 139, 2001. Disponível em: www.rimaeditora.com.br.

DHINGRA, Akshay et al. Molecular Evolution of Human Adenovirus (HAdV) Species C. **Scientific Reports**, *[S. l.]*, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2019. DOI: 10.1038/s41598-018-37249-4.

EPA. Design Manual Municipal Wastewater Disinfection. **Water Engineering Research**, *[S. l.]*, n. October, p. 264, 1986.

EPA. **EPA UV Light disinfection technology in drinking water application**. , 1996.

EPA. **Wastewater technology fcat sheet, Ultar-violet disinfection**. , 1999.

EPA. Ultraviolet Disinfection Guidance Manual. EPA/4601/815-D-03-007, DRAFT. *[S. l.]*, n. June, 2003.

EPA. Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. **Environmental Protection**, *[S. l.]*, v. 2, n. 11, p. 1–436, 2006.

EPA. **Contaminant Candidate List 5 - CCL5**. 2022. Disponível em: https://www.epa.gov/ccl/contaminant-candidate-list-5-ccl-5.

GEERAERD, A. H.; VALDRAMIDIS, V. P.; VAN IMPE, J. F. GInaFiT, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. **International Journal of Food Microbiology**, *[S. l.]*, v. 102, n. 1, p. 95–105, 2005. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.038.

GERCHMAN, Yoram; MAMANE, Hadas; FRIEDMAN, Nehemya; MANDELBOIM, Michal. UV-LED disinfection of Coronavirus: Wavelength effect. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, *[S. l.]*, v. 212, n. September, 2020. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2020.112044.

HAMAMOTO, A.; MORI, M.; TAKAHASHI, A.; NAKANO, M.; WAKIKAWA, N.; AKUTAGAWA, M.; IKEHARA, T.; NAKAYA, Y.; KINOUCHI, Y. New water disinfection system using UVA light-emitting diodes. **Journal of Applied Microbiology**, *[S. l.]*, v. 103, n. 6, p. 2291–2298, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2007.03464.x.

HATCHARD, C. G.; PARKER, C. A. A New Sensitive Chemical Actinometer . II . Potassium Ferrioxalate as a Standard Chemical Actinometer Author (s): C . G . Hatchard and C . A . Parker Source : Proceedings of the Royal Society of London . Series A , Mathematical and Physical Published by. **Proceedings of the Royal Scociets of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, *[S. l.]*, v. 235, n. 1203, p. 518–536, 1956.

HIJNEN, W. A. M.; BEERENDONK, E. F.; MEDEMA, G. J. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 40, n. 1, p. 3–22, 2006. DOI: 10.1016/j.watres.2005.10.030.

HIJNEN, W. A. M.; MEDEMA, G. J. Inactivation of viruses, bacteria, spores and protozoa by ultraviolet irradiation in drinking water practice: A review. **Water Science and Technology: Water Supply**, *[S. l.]*, v. 5, n. 5, p. 93–99, 2005. DOI: 10.2166/ws.2005.0043.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R. ..; TCHOBANOGLUOS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo.

HULO, Chantal; DE CASTRO, Edouard; MASSON, Patrick; BOUGUELERET, Lydie; BAIROCH, Amos; XENARIOS, Ioannis; LE MERCIER, Philippe. ViralZone: A knowledge resource to understand virus diversity. **Nucleic Acids Research**, *[S. l.]*, v. 39, n. SUPPL. 1, p. 576–582, 2011. DOI: 10.1093/nar/gkq901.

INAGAKI, Hiroko; SAITO, Akatsuki; SUGIYAMA, Hironobu; OKABAYASHI, Tamaki; FUJIMOTO, Shouichi. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with Deep-UV LED irradiation. **Emerging Microbes and Infections**, *[S. l.]*, p. 1744–1747, 2020. DOI: 10.1080/22221751.2020.1796529.

JENNY, Richard M.; JASPER, Micah N.; SIMMONS, Otto D.; SHATALOV, Max; DUCOSTE, Joel J. Heuristic optimization of a continuous flow point-of-use UV-LED disinfection reactor using computational fluid dynamics. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 83, p. 310–318, 2015. DOI: 10.1016/j.watres.2015.06.031. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.031.

KANG, Seoyoung; BAE, Jinseung; PARK, Sungsu; KIM, Kyoungjun; LEE, Junghun; YOON, Chulsoo; RYU, Changkook. Design optimization of a cylindrical UV-C LED reactor for effective water disinfection with numerical simulations and test reactor fabrication. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, *[S. l.]*, v. 12, n. 2, p. 112366, 2024. DOI: 10.1016/j.jece.2024.112366. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112366.

KESHAVARZFATHY, Majid; HOSOI, Yamato; OGUMA, Kumiko; TAGHIPOUR, Fariborz. Experimental and computational evaluation of a flow-through UV-LED reactor for MS2 and adenovirus inactivation. **Chemical Engineering Journal**, *[S. l.]*, v. 407, n. September 2020, p. 127058, 2021. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127058. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127058.

KIM, Do Kyun; KIM, Soo Ji; KANG, Dong Hyun. Inactivation modeling of human enteric virus surrogates, MS2, Qβ, and ΦX174, in water using UVC-LEDs, a novel disinfecting system. **Food Research International**, *[S. l.]*, v. 91, p. 115–123, 2017. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.11.042. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.11.042.

KOUTRAS, Carolina; WADE, Richard L. Rapid inactivation of vaccinia , a surrogate virus for monkeypox and smallpox , using ultraviolet-C disinfection. *[S. l.]*, p. 48–51, 2022.

LI, Guo Qiang; WANG, Wen Long; HUO, Zheng Yang; LU, Yun; HU, Hong Ying. Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photoreactivation and dark repair of Escherichia coli. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 126, p. 134–143, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2017.09.030. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.030.

LINDEN, Karl G.; THURSTON, Jeanette; SCHAEFER, Raymond; MALLEY, James P. Enhanced UV inactivation of adenoviruses under polychromatic UV lamps. **Applied and Environmental Microbiology**, *[S. l.]*, v. 73, n. 23, p. 7571–7574, 2007. DOI: 10.1128/AEM.01587-07.

MA, Ben; GUNDY, Patricia M.; GERBA, Charles P.; SOBSEY, Mark D.; LINDEN, Karl G. UV Inactivation of SARS-CoV-2 across the UVC Spectrum: KrCl∗ Excimer, Mercury-Vapor, and Light-Emitting-Diode (LED) Sources. **Applied and Environmental Microbiology**, *[S. l.]*, v. 87, n. 22, 2021. a. DOI: 10.1128/AEM.01532-21.

MA, Ben; LINDEN, Yarrow S.; GUNDY, Patricia M.; GERBA, Charles P.; SOBSEY, Mark D.; LINDEN, Karl G. Inactivation of coronaviruses and phage Phi6 from irradiation across UVC wavelengths. **Environmental Science and Technology Letters**, *[S. l.]*, v. 8, n. 5, p. 425–430, 2021. b. DOI: 10.1021/acs.estlett.1c00178.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STAHL, D. A. **Microbiologia de Brock**. 14. ed. [s.l: s.n.].

MAFART, P.; COUVERT, O.; GAILLARD, S.; LEGUERINEL, I. On calculating sterility in thermal preservation methods : Application of the Weibull frequency distribution model. **Acta Horticulturae**, *[S. l.]*, v. 566, p. 107–114, 2001. DOI: 10.17660/ActaHortic.2001.566.11.

MAHNEL, H; OTTIS, K; HERLYN, M. Stability in drinking and surface water of nine virus species from different genera. **Zentralblatt fur Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene**, *[S. l.]*, v. 164, p. 64–84, 1977.

MAHY, B. M.J; KANGRO, H. O. **Virology Methods Manual**. San Diego.

MAQUART, Marianne; MARLET, Julien. Rapid SARS-CoV-2 inactivation by mercury and LED UV-C lamps on different surfaces. **Photochemical and Photobiological Sciences**, *[S. l.]*, v. 21, n. 12, p. 2243–2247, 2022. DOI: 10.1007/s43630-022-00292-2. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s43630-022-00292-2.

MARTINO, Vincent; OCHSNER, Kyra; PETERS, Paige; ZITOMER, Daniel H.; MAYER,

Brooke K. Virus and Bacteria Inactivation Using Ultraviolet Light-Emitting Diodes. **Environmental Engineering Science**, *[S. l.]*, v. 38, n. 6, p. 458–468, 2021. DOI: 10.1089/ees.2020.0092.

MCDEVITT, James J.; KA, Man Lai; RUDNICK, Stephen N.; HOUSEMAN, E. Andres; FIRST, Melvin W.; MILTON, Donald K. Characterization of UVC light sensitivity of vaccinia virus. **Applied and Environmental Microbiology**, *[S. l.]*, v. 73, n. 18, p. 5760–5766, 2007. DOI: 10.1128/AEM.00110-07.

MINAMIKAWA, Takeo et al. Quantitative evaluation of SARS-CoV-2 inactivation using a deep ultraviolet light-emitting diode. **Scientific Reports**, *[S. l.]*, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-84592-0. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-021-84592-0.

MINH TRAN, Hai Duc; BOIVIN, Sandrine; KODAMATANI, Hitoshi; IKEHATA, Keisuke; FUJIOKA, Takahiro. Potential of UV-B and UV-C irradiation in disinfecting microorganisms and removing N-nitrosodimethylamine and 1,4-dioxane for potable water reuse: A review. **Chemosphere**, *[S. l.]*, v. 286, n. P2, p. 131682, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131682. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131682.

MOHAGHEGH MONTAZERI, Mahyar; TAGHIPOUR, Fariborz. Virtual prototyping and characterization of a point-of-entry UV-LED water disinfection reactor with the synergic effect of radiation, hydrodynamics, and inactivation kinetics. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 230, n. January, p. 119581, 2023. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119581. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119581.

MORI, Mirei et al. Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED. **Medical and Biological Engineering and Computing**, *[S. l.]*, v. 45, n. 12, p. 1237–1241, 2007. DOI: 10.1007/s11517-007-0263-1.

NGUYEN, Thi Minh Hong; SUWAN, Poonyanooch; KOOTTATEP, Thammarat; BECK, Sara E. Application of a novel, continuous-feeding ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system to disinfect domestic wastewater for discharge or agricultural reuse. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 153, p. 53–62, 2019. DOI: 10.1016/j.watres.2019.01.006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.006.

NISHIOKA, Sérgio Andrade. **Sete coronavírus causam doenças em humanos**. 2021. Disponível em: https://www.unasus.gov.br/especial/covid19/markdown/111.

NWACHUKU, Nena; GERBA, Charles P.; OSWALD, Amy; MASHADI, Faezeh D. Comparative inactivation of adenovirus serotypes by UV light disinfection. **Applied and Environmental Microbiology**, *[S. l.]*, v. 71, n. 9, p. 5633–5636, 2005. DOI: 10.1128/AEM.71.9.5633-5636.2005.

NYANGARESI, Paul Onkundi; QIN, Yi; CHEN, Guolong; ZHANG, Baoping; LU, Yinghua; SHEN, Liang. Effects of single and combined UV-LEDs on inactivation and subsequent reactivation of E. coli in water disinfection. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 147, p. 331–341, 2018. DOI: 10.1016/j.watres.2018.10.014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.014.

OGUMA, Kumiko; KITA, Ryo; SAKAI, Hiroshi; MURAKAMI, Michio; TAKIZAWA, Satoshi. Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems. **Desalination**, *[S. l.]*, v. 328, p. 24–30, 2013. DOI: 10.1016/j.desal.2013.08.014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.08.014.

OGUMA, Kumiko; RATTANAKUL, Surapong. UV inactivation of viruses in water: Its potential to mitigate current and future threats of viral infectious diseases. **Japanese Journal of Applied Physics**, *[S. l.]*, v. 60, n. 11, 2021. DOI: 10.35848/1347-4065/ac2b4f.

OGUMA, Kumiko; RATTANAKUL, Surapong; BOLTON, James R. Application of UV Light–Emitting Diodes to Adenovirus in Water. **Journal of Environmental Engineering**, *[S. l.]*, v. 142, n. 3, p. 1–6, 2016. DOI: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001061.

PÁDUA, V. L. Introdução ao tratamento de água. *In*: UFMG (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte. v. 2p. 459.

PANIZZOLO, Marco; GEA, Marta; CARRARO, Elisabetta; GILLI, Giorgio; BONETTA, Silvia; PIGNATA, Cristina. Occurrence of human pathogenic viruses in drinking water and in its sources: A review. **Journal of Environmental Sciences (China)**, *[S. l.]*, v. 132, p. 145–161, 2023. DOI: 10.1016/j.jes.2022.07.035. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.07.035.

RATTANAKUL, Surapong; OGUMA, Kumiko. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against Pseudomonas aeruginosa, Legionella pneumophila, and surrogate

microorganisms. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 130, p. 31–37, 2018. DOI: 10.1016/j.watres.2017.11.047. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.047.

RATTANAKUL, Surapong; OGUMA, Kumiko. Applicability of infectivity assay for the quantification of infectious human adenovirus genotype 5 in UV-irradiated wastewater. **Journal of Water and Health**, *[S. l.]*, v. 19, n. 1, p. 67–78, 2021. DOI: 10.2166/WH.2020.224.

SAGUTI, Fredy; CHURQUI, Marianela Patzi; KJELLBERG, Inger; WANG, Hao; OTTOSON, Jakob; PAUL, Catherine; BERGSTEDT, Olof; NORDER, Heléne; NYSTRÖM, Kristina. The UV Dose Used for Disinfection of Drinking Water in Sweden Inadequately Inactivates Enteric Virus with Double-Stranded Genomes. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, *[S. l.]*, v. 19, n. 14, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19148669.

SAÚDE, Ministério D. A. 25 Boletim Epidemiológico Especial Apresentação. *[S. l.]*, 2024. Disponível em: www.saude.gov.br/svsa.

SHEN, Liang; GRIFFITH, Tiffany Maria; NYANGARESI, Paul Onkundi; QIN, Yi; PANG, Xin; CHEN, Guolong; LI, Minglun; LU, Yinghua; ZHANG, Baoping. Efficacy of UVC-LED in water disinfection on Bacillus species with consideration of antibiotic resistance issue. **Journal of Hazardous Materials**, *[S. l.]*, v. 386, n. December 2019, p. 121968, 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121968. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121968.

SHIMODA, Hiroshi; MATSUDA, Junji; IWASAKI, Tatsuyuki; HAYASAKA, Daisuke. Efficacy of 265-nm ultraviolet light in inactivating infectious SARS-CoV-2. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, *[S. l.]*, v. 7, n. February, p. 100050, 2021. DOI: 10.1016/j.jpap.2021.100050. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100050.

SILVA, Hugo D.; GARCÍA-ZAPATA, Marco T. A.; ANUNCIAÇÃO, Carlos E. Why the Use of Adenoviruses as Water Quality Virologic Marker? **Food and Environmental Virology**, *[S. l.]*, v. 3, n. 3–4, p. 138–140, 2011. DOI: 10.1007/s12560-011-9069-2.

SINHA, Rajeshwar P.; HÄDER, Donat P. UV-induced DNA damage and repair: A review. **Photochemical and Photobiological Sciences**, *[S. l.]*, v. 1, n. 4, p. 225–236, 2002. DOI: 10.1039/b201230h.

SONG, Kai; MOHSENI, Madjid; TAGHIPOUR, Fariborz. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 94, p. 341–349, 2016. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.003.

SONG, Kai; TAGHIPOUR, Fariborz; MOHSENI, Madjid. Microorganisms inactivation by continuous and pulsed irradiation of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). **Chemical Engineering Journal**, *[S. l.]*, v. 343, n. June 2017, p. 362–370, 2019. DOI: 10.1016/j.cej.2018.03.020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.020.

TAKAHASHI, Karin; MATSUBAYASHI, Makoto; OHASHI, Yukio; NAOHARA, Jun; URAKAMI, Itsuo; SASAI, Kazumi; KIDO, Yasutoshi; KANEKO, Akira; TERAMOTO, Isao. Efficacy of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED) at four different peak wavelengths against Cryptosporidium parvum oocysts by inactivation assay using immunodeficient mice. **Parasitology International**, *[S. l.]*, v. 77, n. January, p. 102108, 2020. DOI: 10.1016/j.parint.2020.102108. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.parint.2020.102108.

TIWARI, Ananda et al. Monkeypox outbreak: Wastewater and environmental surveillance perspective. **Science of the Total Environment**, *[S. l.]*, v. 856, n. September 2022, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159166.

TRAN, Hai Nguyen et al. SARS-CoV-2 coronavirus in water and wastewater: A critical review about presence and concern. **Environmental Research**, *[S. l.]*, v. 193, n. September 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110265.

US EPA. Innovative Approaches for Validation of Ultraviolet Disinfection Reactors for Drinking Water Systems. *[S. l.]*, n. March, p. 1–7, 2020.

VERANI, Marco; FEDERIGI, Ileana; DONZELLI, Gabriele; CIONI, Lorenzo; CARDUCCI, Annalaura. Human adenoviruses as waterborne index pathogens and their use for Quantitative Microbial Risk Assessment. **Science of the Total Environment**, *[S. l.]*, v. 651, p. 1469–1475, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.295. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.295.

WANG, Chien Ping; CHANG, Chin Sheng; LIN, Wei Chen. Efficiency improvement of a flow-through water disinfection reactor using UV-C light emitting diodes. **Journal of Water**

Process Engineering, *[S. l.]*, v. 40, n. December 2020, p. 101819, 2021. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101819. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101819.

WANG, Chien Ping; WU, Yi Lin; YANG, Shao Hong. Effect of channel configuration on the water sterilization efficiency of a photoreactor with ultraviolet C light-emitting diodes. **Process Safety and Environmental Protection**, *[S. l.]*, v. 179, n. August, p. 618–627, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2023.09.040. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.09.040.

WHO. Water, sanitation, hygiene, and waste management for SARS-CoV-2, the virus that causes COVID-19. **Interim guidance**, *[S. l.]*, n. 29 July, p. 1–11, 2020. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/water-sanitation-hygiene-and-waste-management-for-the-covid-19-virus-interim-guidance.

WOLFE, M. K.; DUONG, D.; HUGHES, B.; CHAN-HERUR, V.; WHITE, B. J.; BOEHM, Al. B. Detection of monkeypox viral DNA in a routine wastewater monitoring program. **medRxiv**, *[S. l.]*, n. May, p. 1–23, 2016.

WOO, Hyoungmin; BECK, Sara E.; BOCZEK, Laura A.; CARLSON, Kelsie M.; BRINKMAN, Nichole E.; LINDEN, Karl G.; LAWAL, Oliver R.; HAYES, Samuel L.; RYU, Hodon. Uv-c, Dual-wavelength Germicidal Ultraviolet Light Emitting Diodes (LEDs). **Water**, *[S. l.]*, v. 6, n. Cdc, p. 1131, 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Drinking water**. 2022. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water.

WRIGHT, H.; CAIRNS, W. Desinfección de agua por medio de Luz Ultravioleta. **Trojan Technologies Inc.**, *[S. l.]*, p. 1–28, 1998. Disponível em: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Desinfecci?n+de+agua+por+medio+de+luz+ultravioleta#0.

WÜRTELE, M. A.; KOLBE, T.; LIPSZ, M.; KÜLBERG, A.; WEYERS, M.; KNEISSL, M.; JEKEL, M. Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes - UV LEDs - for water disinfection. **Water Research**, *[S. l.]*, v. 45, n. 3, p. 1481–1489, 2011. DOI: 10.1016/j.watres.2010.11.015.

ZHOU, Xiaoqin; LI, Zifu; LAN, Juanru; YAN, Yichang; ZHU, Nan. Kinetics of inactivation and photoreactivation of Escherichia coli using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection. **Ultrasonics Sonochemistry**, *[S. l.]*, v. 35, p. 471–477, 2017. DOI:

10.1016/j.ultsonch.2016.10.028. Disponível em:
http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.028.