

Tecnologia diodo de emissão de luz ultravioleta aplicada à desinfecção de água: revisão da literatura

Ultraviolet light emission diode to disinfect water: a literature review

- **Data de entrada:** 29/08/2023
- **Data de aprovação:** 05/02/2024

Túlio Floripes^{1*} | Cesar Rossas Mota Filho²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.63>

ORCID ID

Floripes T  <https://orcid.org/0000-0002-4011-549X>

Mota Filho CR  <https://orcid.org/0000-0002-3538-8856>

Resumo

O uso de lâmpadas UV de média e baixa pressão de vapor de mercúrio tem sido adotado para inativação de microrganismos na água como uma alternativa ao cloro. No entanto, as lâmpadas UV de vapor de mercúrio apresentam desvantagens, como alto gasto de energia elétrica, alta fragilidade e uso de mercúrio, que é um agente tóxico. Nesse sentido, o uso de tecnologias menos impactantes, mais econômicas e de menor demanda de energia elétrica, como os LEDs, tem ganhado espaço nas pesquisas de tratamento de água e esgoto. Os LEDs apresentam vantagens em relação às lâmpadas UV, como baixo consumo de energia, resistência, facilidade de modulação, possibilidade de ser alimentado por energia solar, emissão de pico de onda específico, entre outras. Os resultados de inativação com LEDs têm demonstrado que a tecnologia é promissora para aplicação nos setores de saneamento, com eficiência comparável às lâmpadas de vapor de mercúrio para eliminação de microrganismos com potencial patogênico, como bactérias e vírus.

Palavras-chave: Tecnologia com eficiência energética. Inativação microbiológica. LEDs UVC.

Abstract

The use of medium- and low-pressure mercury vapor UV lamps has been adopted to inactivate microorganisms in water as an alternative to chlorine. However, mercury vapor UV lamps have disadvantages such as high energy consumption, fragility, and the use of mercury, which is a toxic agent. Thus, the use of less impactful, more economical, and lower energy-demanding technologies, such as LEDs, has been gaining ground in research on water and wastewater treatment. LEDs have advantages over UV lamps, such as low energy consumption, durability, ease of modulation, the possibility of being powered by solar energy, the emission of a specific wavelength peak, among others. Inactivation results with LEDs have shown that the technology is promising for sanitation sector applications, with an efficiency comparable to that of mercury vapor lamps for microorganisms such as pathogenic bacteria and viruses.

Keywords: Energy-Efficient Technology. Microbiological inactivation. UVC LEDs.

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil.

² Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil.

* **Autor correspondente:** tuliofloripes@cefetmg.br

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água segura ainda é um desafio global, especialmente em países em desenvolvimento e áreas rurais, onde a dificuldade é maior devido à falta de universalização do serviço de abastecimento público, seja ele simplificado ou completo. Entre os tratamentos simplificados, a desinfecção com cloro se destaca pela sua facilidade de aplicação e baixo custo. No entanto, o uso de cloro pode resultar na formação de trihalometanos e outros subprodutos da cloração, que são potencialmente prejudiciais à saúde, dependendo da qualidade da água. Além disso, o cloro é pouco eficaz na inativação de protozoários, como cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp., além de endósporos, o que pode representar um risco significativo à saúde pública.

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias eficientes para a inativação de microrganismos patogênicos, especialmente os resistentes à cloração, é de grande importância para a saúde e o bem-estar da população (Song; Mohseni; Taghipour, 2016). Entre essas tecnologias, a radiação ultravioleta na faixa germicida (UVC) tornou-se amplamente utilizada para a desinfecção de água potável e esgoto sanitário, sendo capaz de inativar efetivamente diversos microrganismos na água. A UVC tem sido cada vez mais adotada devido às suas vantagens sobre a desinfecção convencional, como a ausência de adição de produtos químicos, a não formação de subprodutos de desinfecção, a inexistência de introdução de resistência desinfetante nas bactérias e a facilidade de adaptação em processos existentes (Chen; Loeb; Kim, 2017; Mori *et al.*, 2007; Song; Mohseni; Taghipour, 2016). Por essas razões, a desinfecção por UVC tem sido recomendada como uma alternativa aos desinfetantes químicos no tratamento de águas superficiais (United States Environmental Protection Agency, 2006), atingindo em 2011 a marca de mais de 7.000 instalações em todo o mundo.

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 apresentam características operacionais importantes, por exemplo: 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% a 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; Kim, 2017; Song; Mohseni; 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 por meio da 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 uma fonte alternativa de radiação, com potencial para causar uma grande revolução no campo da desinfecção de água e efluentes.

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, na Tabela 1 são des-

critas 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 tem seguido, desde 2007, 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.

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens dos LEDs-UV.

Característica	Lâmpadas convencionais de UV	LEDs-UV	Vantagens em relação às 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 mm ²	Fácil integração
Temperatura da superfície (em operação)	Lâmpada policromática (≈ 600 °C) Lâmpada monocromática de alta intensidade (≈ 100 °C)	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

Fonte: Adaptado de Chen, Loeb e Kim (2017).

Nesse 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. Nesse contexto, a Yole Developpement projeta

que o mercado será avaliado em US\$ 3,5 bilhões em 2026, com uma taxa de crescimento anual 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.

2 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; Kim, 2017; Simons; Pagan; 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 de um material tipo n (cátodo) com 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; Kim, 2017; Universidade Federal de Minas Gerias [UFMG], 2014).

Quando elétrons e buracos se encontram, eles se recombinam, formando uma região conhecida

como região de depleção, em que 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; Kim, 2017; UFMG, 2014).

A quantidade de energia liberada e, conseqüentemente, 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, em que apenas o vapor de mercúrio, com uma estrutura eletrônica, é utilizado para produzir luz (Simons; Pagan; 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 (InGaAlN) devido à capacidade de gerar comprimentos de onda na faixa germicida (UVC).

3 EFICÁCIA DE INATIVAÇÃO DE LEDS-UV EM DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA

O comprimento de onda desempenha um papel fundamental no processo de inativação 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 absor-

bância, tornando essencial uma análise integrada dos resultados de inativação.

Nesse contexto, a tecnologia LED tem se mostrado viável devido à sua capacidade de emitir radiação em comprimentos de onda específicos, abrangendo as regiões de UVA, UVB e UVC. Na Tabela 2 são resumidos os dados para inativação de microrganismos utilizando LEDs na faixa UVA.

Tabela 2 – Eficiência da inativação de LEDs UVA para bactérias.

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Dose UV (mj/cm ²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mj/cm ² por log de inativação)	Referência
365	<i>E. coli</i> DH5α	54.000	3,9	1.384	Mori <i>et al.</i> (2007)
365	<i>E. coli</i> DH5α	315.000	5,7	55.263	Hamamoto <i>et al.</i> (2007)
365	Bactérias Mesófilas	4,22	0,3	12,5	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)
405	Bactérias Mesófilas	25,58	0,3	88,0	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)

Chevremont *et al.* (2012a), 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 demonstra a mesma capacidade de inativação em doses tão baixas quanto o UVC, o que implica tempos de exposição mais longos e, conseqüentemente, maior consumo de energia para alcançar eficiência similar.

Os dados de inativação para microrganismos na faixa UVB estão apresentados na Tabela 3.

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.

Tabela 3 – Eficiência da Inativação de LEDs-UVB para bactérias, bacteriófagos e vírus.

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Dose UV (mJ/cm ²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mJ/cm ² por log de inativação)	Referência
Bactérias					
365	<i>E. coli</i> DH5α	54.000	3,9	1.384	Mori <i>et al.</i> (2007)
365	<i>E. coli</i> DH5α	315.000	5,7	55.263	Hamamoto <i>et al.</i> (2007)
280	<i>Tetraselmis</i>	100	2,2	45,5	Choi <i>et al.</i> (2009)
282	<i>B. Subtilis</i>	60	7,2	8,3	Würtele <i>et al.</i> (2011)
280	bactérias mesófilas	1,37	1,4	1,0	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)
280	<i>E. coli</i> K12 (IFO 3301)	13,8	4	3,5	Oguma <i>et al.</i> (2013)
310	<i>E. coli</i> K12 (IFO 3301)	56,9	0,6	94,8	Oguma <i>et al.</i> (2013)
280	<i>E. coli</i> K12 (ATCC29425)	9,67	3	3,22	Beck <i>et al.</i> (2017)
280	<i>E. coli</i> (CGMCC 13373)	15,35	4,5	3,41	Li <i>et al.</i> (2017)
280	<i>E. coli</i> (IFO 3301)	9,2	4	2,3	Rattanakul e Oguma (2018)
300	<i>E. coli</i> (IFO 3301)	80	4	20	Rattanakul e Oguma (2018)
280	<i>B. subtilis</i>	50	4	12,5	Rattanakul e Oguma (2018)
300	<i>B. subtilis</i>	1200	4	300	Rattanakul e Oguma (2018)
280	<i>P. aeruginosa</i>	7,5	3	2,5	Rattanakul e Oguma (2018)
300	<i>P. aeruginosa</i>	62	3	20,66	Rattanakul e Oguma (2018)
280	<i>L.pneumophila</i>	9	4	2,25	Rattanakul e Oguma (2018)
300	<i>L.pneumophila</i>	85	4	21,25	Rattanakul e Oguma (2018)
285	<i>E. coli</i> (ATCC 11229)	15,3	2,8	5,46	Song, Taghipour e Mohseni (2019)
Bacteriófagos					
280	φX174	8,9	3,2	2,8	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
280	Qβ	43	1,5	28,7	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
280	MS2	58	1,9	30,5	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
280	MS2	38,5	2	19,25	Beck <i>et al.</i> (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 <i>et al.</i> (2017)

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 4 condensa os dados de inativação para diferentes comprimentos de onda na faixa UVC.

Tabela 4 – Eficiência da Inativação de LEDs-UVC para bactérias, bacteriófagos e vírus.

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Dose UV (mj/cm ²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mj/cm ² por log de inativação)	Referência
Bactérias					
265	<i>E. coli</i> K12 (ATCC 29425)	20	3,4	5,9	Chatterley e Linden (2010)
255	<i>Tetraselmis</i>	100	2,2	45,5	Choi <i>et al.</i> (2009)
265		100	2,6	38,46	Choi <i>et al.</i> (2009)
255	<i>E. coli</i> (ATCC 11229)	9	2,7	5,3	Bowker <i>et al.</i> (2011)
275	<i>E. coli</i> (ATCC 11229)	9	3,8	2,4	Bowker <i>et al.</i> (2011)
269	<i>B. Subtilis</i>	40	5,9	6,8	Würtele <i>et al.</i> (2011)
254	bactérias mesófilas	0,73	0,8	1,0	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)
265	<i>E. coli</i> K12 (IFO 3301)	10,8	4	2,7	Oguma <i>et al.</i> (2013)
260	<i>E. coli</i> K12 (ATCC29425)	10,34	3	3,44	Beck <i>et al.</i> (2017)
265	<i>E. coli</i> (CGMCC 13373)	10,91	4,5	2,42	Li <i>et al.</i> (2017)
255	<i>E. coli</i> (ATCC 15597)	20	4	5	Zhou <i>et al.</i> , 2017)
267	<i>E. coli</i> (CGMCC 13373)	11,52	4	2,88	Nyangaresi <i>et al.</i> (2018)
275	<i>E. coli</i> (CGMCC 13373)	23,04	4	5,76	Nyangaresi <i>et al.</i> (2018)
265	<i>E. coli</i> (IFO 3301)	5	4	1,25	Rattanakul e Oguma (2018)
265	<i>B. subtilis</i>	23	4	5,75	Rattanakul e Oguma (2018)
265	<i>P. aeruginosa</i>	4,2	3	1,3	Rattanakul e Oguma (2018)
265	<i>L.pneumophila</i>	4	4	1	Rattanakul e Oguma (2018)
265	<i>E. coli</i> (ATCC 11229)	4,2	1,8	2,33	Song, Taghipour e Mohseni (2019)
268	TRB - 3	15,36	5,4	2,84	Shen <i>et al.</i> (2020)
245	TRB - 3	15,36	5,4	2,84	Shen <i>et al.</i> (2020)
268	TRB -5	23,04	5,7	4,04	Shen <i>et al.</i> (2020)
245	TRB -5	30,72	5,7	5,38	Shen <i>et al.</i> (2020)
Bacteriófagos					
255	ϕ X174	6,4	3,7	1,7	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
255	Q β	30	2,4	12,5	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
255	MS2	41	3,2	12,8	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
255	MS2	60	2,3	26,1	Bowker <i>et al.</i> (2011)
275	MS2	60	2,1	28,6	Bowker <i>et al.</i> (2011)
255	T7	20	3,9	5,1	Bowker <i>et al.</i> (2011)
275	T7	20	4,7	4,3	Bowker <i>et al.</i> (2011)
260	MS2	30,3	2	15,5	Beck <i>et al.</i> (2017)
266	MS2	9	7	1,28	Kim, Kim e Kang (2017)
266	ϕ X174	1	7	0,14	Kim, Kim e Kang (2017)
266	Q β	9	7	1,28	Kim, Kim e Kang (2017)
279	MS2	9	6	1,5	Kim, Kim e Kang (2017)
279	ϕ X174	2	6	0,33	Kim, Kim e Kang (2017)
279	Q β	9	6	1,5	Kim, Kim e Kang (2017)
265	Q β	48	4	12	Rattanakul e Oguma (2018)
265	MS2	4,9	2,5	1,96	Song, Taghipour e Mohseni (2019)
Vírus					
260	HAdV2	122,89	4	30,72	Beck <i>et al.</i> (2017)

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 absorvância 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).

Para avaliar os efeitos dos LEDs-UVC sobre os microrganismos estudados, os autores 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 ϕ X174, Q β e MS2, dada a resistência comparável desses microrganismos à radiação UV em relação ao *Cryptosporidium* sp.

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 X174, resultando em eficiências de inativação próximas de 3,7 e 3,2 log, respectivamente. No entanto, para os bacteriófagos MS2 e Q β , a eficiência de inativação foi maior em 255 nm (3,2 e 2,4 log) 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 Q β em 280 nm, esse comprimento de onda se mostrou 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 Q β 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 res-

posta 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 log). 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; 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; 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. Rattanukul 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), foram repostadas 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; Kang, 2017) e 265 nm (Song; Taghipour; 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 se mostraram menos eficientes na inativação do bacteriófago, apresentando uma dose de resposta de 2,43 mJ/cm² por log. A Tabela 5 apresenta os resultados do uso combinado de LEDs operando nas faixas UVA, UVB e UVC do espectro eletromagnético para inativação de microrganismos.

Tabela 5 – Eficiência da Inativação de LEDs-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/cm ²)	Log de Inativação	Dose de Resposta (mJ/cm ² por log de inativação)	Referência
Bactérias					
280/365	bactérias mesófilas	5,59	3,5	1,6	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)
280/405	bactérias mesófilas	26,95	3,5	7,7	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)
254/365	bactérias mesófilas	4,95	2,4	2,1	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)
254/405	bactérias mesófilas	26,31	2,2	11,9	Chevremont <i>et al.</i> (2012a)
260/280	<i>E. coli</i> K12 (ATCC29425)	9,37	3	3,12	Beck <i>et al.</i> (2017)
265/280	<i>E. coli</i> (CGMCC 13373)	13,78	4,5	3,06	Li <i>et al.</i> (2017)
267/275	<i>E. coli</i> (CGMCC 13373)	15,35	4	3,83	Nyangaresi <i>et al.</i> (2018)
265/285	<i>E. coli</i> (ATCC 11229)	19,5	4,6	4,23	Song, Taghipour e Mohseni (2019)
Bacteriófago					
260/280	MS2	32,8	2	16,4	Beck <i>et al.</i> (2017)
Vírus					
260/280	HAdV2	105	4	26,25	Beck <i>et al.</i> (2017)

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 $3,5 > 0,3 + 1,4 = 1,7$, padrão observado também em outras combinações avaliadas.

Chevremont *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. 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*, em que $3 < 3 + 3 = 6$ log, 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, em que $2 < 2 + 2 = 4$ 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, em que $4 < 4 + 4 = 8$ log, 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, em que $4,5 < 4,5 + 4,5 = 9$ 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. Essa 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) e Nyangaresi *et al.* (2018), foram idênticos ao somatório dos comprimentos de onda isolados, em que $4,6 = 1,8 + 2,8 = 4,6$. 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, dentre todas as combinações, a única 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, 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 com-

binadas 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 por meio 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. Na Figura 1 está ilustrada a diferença entre o aparelho de feixe colimado e experimento para LED-UV.

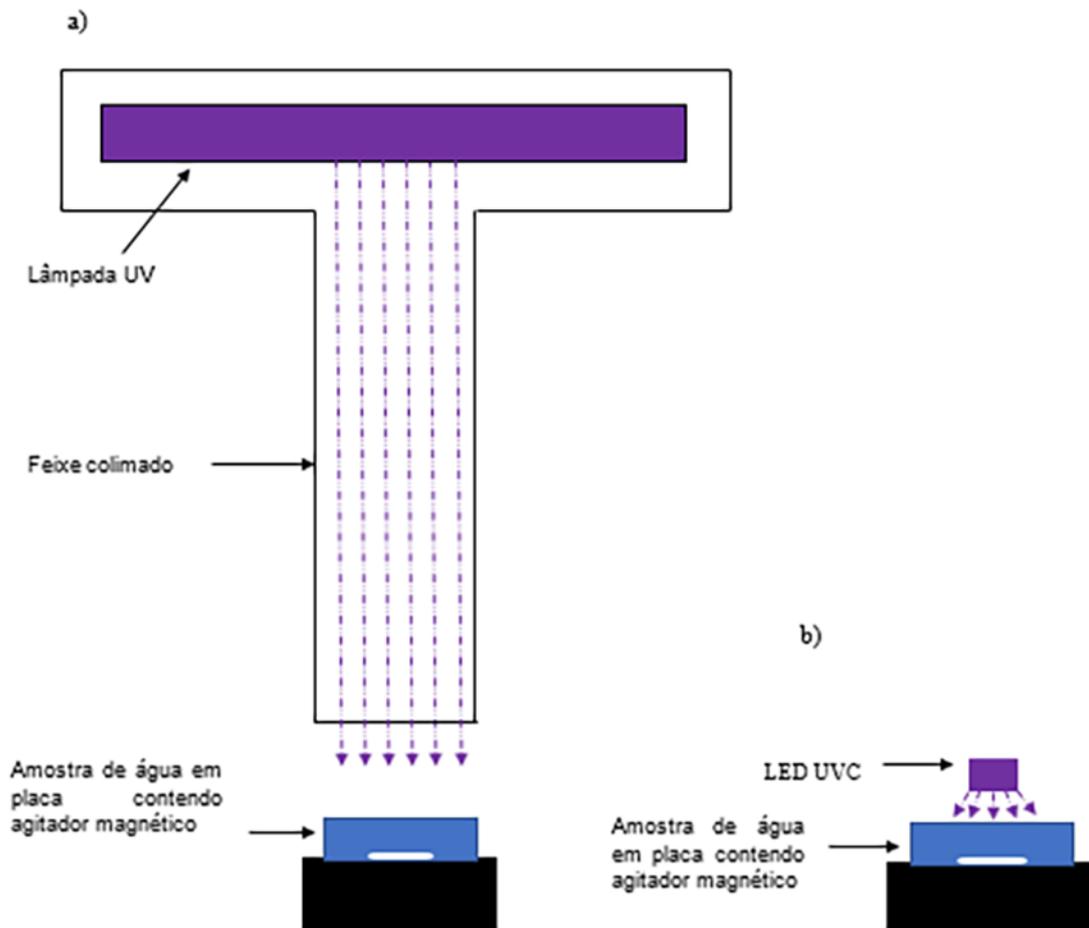


Figura 1 – Esquema de aparato de desinfecção por tubo colimado (a) e LED (b).

Fonte: Adaptado de Song, Mohseni e Taghipour (2016).

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. Esse 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.

No entanto, devido às diferenças substanciais nas características dos LEDs e das lâmpadas tradicionais de baixa pressão (LP), não é espe-

rado 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, conseqüentemente, 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; Taghipour, 2016).

Em suma, pode-se ressaltar que, para o mesmo comprimento de onda, de acordo com a dose de resposta por log de inativação, a sensibilidade dos organismos à inativação tende a seguir a ordem: $\phi X174$ ou *L. pneumophila* > *E. coli* > T7 (bacteriófagos tipo T) > *B. subtilis* > MS2 ou Q β > HAdV.

4 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/m), que representa a relação entre o log de inativação e a dose UV aplicada (Li *et al.* 2019; Song; Mohseni; 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 6 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, conseqüente, 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 ($k=1 \text{ cm}^2/\text{m}$) em comparação com os comprimentos de onda de 280 nm ($k=0,44 \text{ cm}^2/\text{m}$) e 254 nm ($k=0,66 \text{ cm}^2/\text{m}$) (Rattanukul; Oguma, 2018). Similarmente, a sensibilidade do $\phi X174$ é maior em comprimentos de onda próximos a 265 nm ($k=7 \text{ cm}^2/\text{J}$), em comparação com os outros comprimentos de onda (Aoyagi *et al.*, 2011; Kim; Kim; 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 ($k=0,39 \text{ cm}^2/\text{J}$), o que demonstra a viabilidade de LEDs-UVC para inativação em comprimentos de onda superiores a 254 nm (Hijnen; Beerendonk; 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.

Essa 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, conseqüentemente, 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.

Tabela 6 – Sensibilidade UV para LEDs e lâmpada de baixa pressão (LP).

Comprimento de onda (nm)	Microrganismo	Fonte de UV	K (cm ² /mj)	Referência
Bactérias				
254	<i>E. coli</i>	LP	0,50	Hijnen; Medema (2005)
254	<i>B. subtilis</i>	LP	0,06	Hijnen; Medema (2005)
254	<i>E. coli</i> K12 (ATCC29425)	LP	0,27	Beck <i>et al.</i> (2017)
254	<i>E. coli</i> (CGMC13373)	LP	0,35	Li <i>et al.</i> (2017)
254	<i>L.pneumophila</i>	LP	0,66	Rattanakul e Oguma (2018)
260	<i>E. coli</i> K12 (ATCC29425)	UV - LED	0,29	Beck <i>et al.</i> (2017)
265	<i>L.pneumophila</i>	UV - LED	1	Beck <i>et al.</i> (2017)
265	<i>E. coli</i> K12 (IFO3301)	UV - LED	0,37	Oguma <i>et al.</i> (2013)
265	<i>E. coli</i> (CGMCC13373)	UV - LED	0,41	Li <i>et al.</i> (2017)
265	<i>E. coli</i> (ATCC11229)	UV - LED	0,42	Song, Taghipour e Mohseni (2019)
265	<i>B. subtilis</i>	UV - LED	0,17	Rattanakul e Oguma (2018)
280	<i>E. coli</i> K12 (IFO3301)	UV - LED	0,28	Oguma <i>et al.</i> (2013)
280	<i>E. coli</i> K12 (ATCC29425)	UV - LED	0,31	Beck <i>et al.</i> (2017)
280	<i>E. coli</i> (CGMCC13373)	UV - LED	0,29	Li <i>et al.</i> (2017)
280	<i>B. subtilis</i>	UV - LED	0,08	Rattanakul e Oguma (2018)
280	<i>L.pneumophila</i>	UV - LED	0,44	Rattanakul e Oguma (2018)
285	<i>E. coli</i> (ATCC11229)	UV - LED	0,18	Song, Taghipour e Mohseni (2019)
Bacteriófagos				
254	T7	LP	0,23	Hijnen; Medema (2005)
254	X174	LP	0,39	Hijnen, Beerendonk e Medema (2006)
254	MS2	LP	0,05	Beck <i>et al.</i> (2017)
254	Q	LP	0,08	Rattanakul e Oguma (2018)
255	T7	UV - LED	0,19	Bowker <i>et al.</i> (2011)
260	MS2	UV - LED	0,06	Beck <i>et al.</i> (2017)
265	Q	UV - LED	0,08	Rattanakul e Oguma (2018)
266	X174	UV - LED	7	Kim, Kim e Kang (2017)
275	MS2	UV - LED	0,03	Bowker <i>et al.</i> (2011)
275	T7	UV - LED	0,23	Bowker <i>et al.</i> (2011)
279	X174	UV - LED	0,33	Kim, Kim e Kang (2017)
280	X174	UV - LED	0,36	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
280	MS2	UV - LED	0,03	Aoyagi <i>et al.</i> (2011)
280	Q	UV - LED	0,05	Rattanakul e Oguma (2018)
Vírus				
254	HAdV	LP	0,02	Hijnen; Medema (2005)
260	HAdV	UV - LED	0,03	Beck <i>et al.</i> (2017)
280	HAdV	UV - LED	0,04	Beck <i>et al.</i> (2017)

Tendo em vista o uso da *E. coli* como indicador de contaminação fecal em águas de abastecimento, diversos estudos têm utilizado esse 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 a 0,42 cm^2/mJ , valores mais baixos do que aqueles reportados para *L. pneumophila* e ϕX174 , demonstrando a menor sensibilidade da *E. coli* (Beck *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017; Oguma *et al.*, 2013; Song; Taghipour; 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 a 0,50 cm^2/J (Beck *et al.*, 2017; Hijnen; 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, uma vez que, enquanto a LP utiliza um aparato de feixe colimado, con-

centrando 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 apresenta 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 o 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.

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 do 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 $k=0,23 \text{ cm}^2/\text{J}$, foi similar ao valor encontrado para o LED operando em 275 nm (Hijnen; 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 cm^2/mJ utilizando LEDs de 265 nm, e 0,08 cm^2/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 cm^2/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 cm^2/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 cm^2/J reportado por Beck *et al.* (2017) para a LP, reforçando a eficiência dos LEDs operando em 260 nm na inativação do MS2.

Rattanukul e Oguma (2018), estudando a inativação do bacteriófago Q β 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 cm^2/J , respectivamente. Esses valores indicam que o Q β 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 Q β em 265 nm ocorre com a mesma efetividade que a observada para LP, apesar da diferença na potência de emissão. Isso demonstra que o Q β tende a ter um pico de máxima absorção próximo de 265 nm, resultando em uma eficiente inativação nesse 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 6, pode-se inferir que a ordem de sensibilidade dos microrganismos à radiação UV segue a sequência: *L. pneumophila* > ϕ X174 > *E. coli* > T7 (bacteriófagos tipo T) > *B. subtilis* > Q β > MS2 > HAdV.

5 CONCLUSÕES

A tecnologia de desinfecção de água por diodo emissor de luz ultravioleta (LED-UVC), que tem avançado rapidamente na última década, demonstrou ser eficaz na inativação de microrganismos, com eficiência próxima à das lâmpadas de baixa pressão (LP) e média pressão (MP) de vapor de mercúrio. Essa tecnologia é promissora, apresentando várias vantagens, como a ausência de mercúrio, menor consumo de energia elétrica, facilidade de adaptação a sistemas de tratamento de água, possibilidade de integração em sistemas de energia solar (permitindo uso em tratamento pontual e móvel) e emissão em comprimentos de onda específicos.

Apesar dessas vantagens, os microrganismos mostram sensibilidades diferentes aos diversos comprimentos de onda, o que pode ser uma desvantagem. A variabilidade nos resultados de inativação indica a necessidade de padronização na determinação da dose UV dos LEDs e dos ensaios de inativação. Atualmente, alguns estudos apresentam dados em função da dose fornecida, e outros em função do tempo de inativação, dificultando a comparação. Além disso, as metodologias para determinar a dose UV variam entre radiômetros e actinometria química, o que pode influenciar os valores das constantes de inativação (k). A combinação de LEDs em diferentes comprimentos de onda não tem mostrado efeitos sinérgicos significativos.

A inativação de microrganismos por LEDs-UVC segue os princípios das lâmpadas de vapor de mercúrio, baseando-se na indução de danos no DNA dos microrganismos, levando à formação de dímeros de pirimidina. A absorção máxima de DNA ocorre entre 200 e 300 nm, com pico próximo de 260 nm, o que sugere que LEDs emitindo próximo a esse pico são mais eficazes. Além disso, LEDs com emissão em torno de 280 nm podem causar danos mais severos ao material genético, impedindo a ação dos mecanismos de reparo do DNA.

Estudos têm demonstrado que LEDs-UV operando na faixa do UVA, isoladamente, têm baixa eficiência na inativação de microrganismos, devido à baixa absorção de UV pelo DNA nessa faixa. A inativação com UVA está associada à geração de espécies reativas de oxigênio, como peróxido de hidrogênio e radicais hidroxilas, a partir da foto-oxidação. Isso tem motivado pesquisas com LEDs-UVA em reatores dopados com dióxido de titânio (TiO₂) e em processos Fenton/UV.

Em geral, os LEDs-UV têm mostrado eficácia satisfatória na inativação de microrganismos, com eficiência de remoção variando entre 0,8 e 7 log e doses variando entre 0,7 e 122 mJ/

cm². Eles são promissores para a inativação de microrganismos de interesse sanitário, como *L. pneumophila* e *E. coli*. Com base nos dados, a resistência dos microrganismos, em termos de doses de resposta por log de inativação, tende a seguir a ordem: ϕ X174 ou *L. pneumophila* > *E. coli* > T7 (bacteriófagos tipo T) > *B. subtilis* > MS2 > Q β > HAdV. A ordem de sensibilidade dos microrganismos à UVC parece ser: *L. pneumophila* > ϕ X174 > *E. coli* > T7 > *B. subtilis* > Q β > MS2 > HAdV. Isso aponta para uma maior resistência à inativação dos vírus e bacteriófagos em comparação com *E. coli*, que é atualmente utilizada como indicador de contaminação fecal.

Esses resultados sugerem a necessidade de discutir o uso do bacteriófago MS2, que tem resistência à inativação próxima à do *Cryptosporidium*, como indicador de contaminação de mananciais e eficiência do processo de tratamento de água. O MS2 apresenta resistência similar à de vírus patogênicos e tem uma metodologia de detecção simples, o que pode aumentar a confiabilidade do processo de desinfecção.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Floripes, T, Mota CR; **Metodologia:** Floripes, T; **Validação:** Mota, CR; **Investigação:** Floripes, T, Mota, CR; **Redação do rascunho original:** Floripes, T; **Revisão e Edição:** Floripes, T, Mota CR; **Supervisão:** Mota, CR.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOYAGI, Y.; TAKEUCHI, Misaichi; YOSHIDA, Kaoru; KUROUCHI, Masahito; YASUI, Nobuhito; KAMIKO, Naoyuki; ARAKI, Tutomu; NANISHI, Y *et al.* Inactivation of bacterial viruses in water using deep ultraviolet semiconductor light-emitting diode. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 137, n. 12, p. 1215-1218, 2011.
- BECK, S. E.; RYU, H.; BOCZEK, L. A.; CASHDOLLAR, J. L.; JEANIS, K. M.; ROSENBLUM, J. S.; LAWAL, O. R.; LINDEN, Karl G. Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-wavelength synergy. **Water Research**, Amsterdam, v. 109, p. 207-216, 2017.

- BOWKER, C.; SAIN, A.; SHATALOV, M.; DUCOSTE, J. Microbial UV fluence-response assessment using a novel UV-LED collimated beam system. **Water Research**, Amsterdam, v. 45, n. 5, p. 2011-2019, 2011.
- CHATTERLEY, C.; LINDEN, K. Demonstration and evaluation of germicidal UV-LEDs for point-of-use water disinfection. **Journal of Water and Health**, London, v. 8, n. 3, p. 479-486, 2010.
- CHEN, J.; LOEB, S.; KIM, J. H. 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.
- 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**, Amsterdam, v. 426, p. 304-310, 2012a.
- 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**, Amsterdam, v. 285, p. 219-225, 2012b.
- CHOI, S. K.; KIM, S. W.; PARK, D. W.; KIL, G. S.; CHOI, C. Y. Disinfection of phytoplankton by application of UV LED. *In*: LUPULESCU, N. B.; MASTORAKIS, N. E.; LAPADATESCU, L. (Org.). **Proceedings of the 2nd International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering (MN'09)**. Brasov: WSEAS Press, 2009. p. 87-91.
- HAMAMOTO, A.; MORI, M.; TAKAHASHI, A.; NAKANO, M.; WAKIKAWA, N.; AKUTAGAWA, M.; IKEHARA, T.; NAKAYA, Y.; KINOUCI, Y. New water disinfection system using UVA light-emitting diodes. **Journal of Applied Microbiology**, Fort Myers, v. 103, n. 6, p. 2291-2298, 2007.
- 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**, London, v. 5, n. 5, p. 93-99, 2005.
- 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**, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 3-22, 2006.
- KIM, D. K.; KIM, S. J.; KANG, D. H. Inactivation modeling of human enteric virus surrogates, MS2, Q, and X174, in water using UVC-LEDs, a novel disinfecting system. **Food Research International**, Amsterdam, v. 91, p. 115-123, 2017.
- LI, G. Q.; WANG, W. L.; HUO, Z. Y.; LU, Y.; HU, H. Y. Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photoreactivation and dark repair of *Escherichia coli*. **Water Research**, Amsterdam, v. 126, p. 134-143, 2017.
- LI, X.; CAI, M.; WANG, L.; NIU, F.; YANG, D.; ZHANG, G. Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 659, p. 1415-1427, 2019.
- METCALF; EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre, 2016.
- MORI, M.; HAMAMOTO, A.; TAKAHASHI, A.; NAKANO, M.; WAKIKAWA, N.; TACHIBANA, S.; NAKAYA, M.; AKUTAGAWA, M.; KINOUCI, Y. Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED. **Medical and Biological Engineering and Computing**, Rockville Pike, v. 45, n. 12, p. 1237-1241, 2007.
- NYANGARESI, P. O.; QIN, Y.; CHEN, G.; ZHANG, B.; LU, Y.; SHEN, L. Effects of single and combined UV-LEDs on inactivation and subsequent reactivation of *E. coli* in water disinfection. **Water Research**, Amsterdam, v. 147, p. 331-341, 2018.
- OGUMA, K. UV LEDs for water treatment: research overview and perspectives. **IUVA News**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 18-20, 2018.
- OGUMA, K.; KITA, R.; SAKAI, H.; MURAKAMI, M.; TAKIZAWA, S. Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems. **Desalination**, Amsterdam, v. 328, p. 24-30, 2013.
- RATTANAKUL, S.; OGUMA, K. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms. **Water Research**, Amsterdam, v. 130, p. 31-37, 2018.
- SHEN, L.; GRIFFITH, T. M.; NYANGARESI, P. O.; QIN, Y.; PANG, X.; CHEN, G.; LI, M.; LU, Y.; ZHANG, B. Efficacy of UVC-LED in water disinfection on *Bacillus* species with consideration of antibiotic resistance issue. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 386, 2020.
- SIMONS, R. M.; PAGAN, J.; LAWAL, O. Low-maintenance, consumables-free disinfection by UV-C LEDs. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SYSTEMS, 48., 2018, Albuquerque. **Anais [...]**. Emmaus: ICES, 2018. p. 1-11.
- SONG, K.; MOHSENI, M.; TAGHIPOUR, F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review. **Water Research**, Amsterdam, v. 94, p. 341-349, 2016.
- SONG, K.; TAGHIPOUR, F.; MOHSENI, M. Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 665, p. 1103-1110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.041>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. **Environmental Protection**, [S. l.], v. 2, n. 11, 2006.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Diodo Semicondutor**. 2014. Disponível em: https://www.fisica.ufmg.br/ciclo-basico/wp-content/uploads/sites/4/2020/05/Diodo_semicondutor.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

WÜRTELE, M. A.; KOLBE, T.; LIPSZ, M.; KÜLBERG, A.; WEYERS, M.; KNEISSEL, M.; JEKEL, M. Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes – UV LEDs – for water disinfection. **Water Research**, Amsterdam, v. 45, n. 3, p. 1481-1489, 2011.

YIN, R.; SHANG, C. UV LED 101: fundamentals and applications of UV LEDs in water treatment. **IUVA NEWS**, [S. l.], 2018.

YOLE GROUP. **UV LEDs and UV lamps – market and technology trends 2021**. [S. l.]: Sample, 2021.

ZHOU, X.; LI, Z.; LAN, J.; YAN, Y.; ZHU, N. Kinetics of inactivation and photoreactivation of *Escherichia coli* using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection. **Ultrasonics Sonochemistry**, Amsterdam, v. 35, p. 471-477, 2017.