

834 – PROPOSTA DE REATOR FLUTUANTE DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA PARA DESINFECÇÃO DE LAGOAS FACULTATIVAS

Daniel Assis Barroso⁽¹⁾

Oceanógrafo (UNIMONTE), pós-graduado em Gestão da Qualidade para o Meio Ambiente (PUC), mestre em Avaliação de Impactos Ambientais (UNILASALLE) e doutor em Tecnologia Ambiental (UNAERP).

Thales Faria Tonifrance da Silva⁽²⁾

Graduando em Engenharia Química da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP).

Marília Vasconcellos Agnesini⁽³⁾

Engenheira Química (USP), mestre e doutora em Tecnologia Ambiental (UNAERP). Professora e pesquisadora dos cursos de graduação em Engenharia Química (UNAERP) e de pós-graduação em Tecnologia Ambiental (UNAERP). Sócia-proprietária da consultoria Agnesini & Ismail Ambiental.

Isadora Alves Lovo Ismail⁽⁴⁾

Engenheira Química (UNAERP), mestre e doutora em Tecnologia Ambiental (UNAERP). Pós-doutoranda em Engenharia Hidráulica e Saneamento (EESC – USP). Professora e pesquisadora dos cursos de graduação em Engenharia Química (UNAERP) e de pós-graduação em Tecnologia Ambiental (UNAERP). Sócia-proprietária da consultoria Agnesini & Ismail Ambiental.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Costábile Romano, 2201 Ribeirânia – Ribeirão Preto - São Paulo - 14096-900 - Brasil - Tel: +55 (16) 3603-7792 e-mail: daniel.barroso@sou.unaerp.edu.br

RESUMO

O tratamento de efluentes é fundamental para a preservação dos recursos hídricos, a proteção da saúde pública e a promoção do desenvolvimento sustentável, ao evitar a contaminação de corpos d'água e a degradação ambiental. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento, dimensionamento e avaliação de um reator flutuante de radiação ultravioleta (UV-C) como alternativa para o tratamento terciário de efluentes provenientes de lagoas facultativas. A proposta visa à remoção eficiente de micro-organismos patogênicos, com foco principal na bactéria *Escherichia coli*, um dos principais indicadores de contaminação fecal em corpos hídricos. O reator, construído com lâmpadas UV-C e montado sobre uma estrutura modular flutuante, foi testado em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada em Lorena – SP, a partir de amostras coletadas na saída das lagoas facultativas. Foram realizados ensaios com diferentes tempos de exposição à radiação ultravioleta, sendo observada uma redução de até 97% na concentração de *E. coli*, com até 80% de remoção já nos primeiros 1,69 segundos de exposição. Esses resultados evidenciam a alta eficiência do reator, mesmo em condições ambientais desfavoráveis como elevada turbidez e coloração da água. O sistema se destacou por seu baixo custo de investimento, facilidade de transporte entre diferentes ETES, operação autônoma com energia solar e capacidade de adaptação a diferentes pontos da lagoa. A tecnologia proposta mostrou-se promissora como ferramenta complementar de desinfecção em sistemas de tratamento de esgoto, contribuindo para a proteção dos recursos hídricos e da saúde pública. Recomenda-se a continuidade de estudos para ampliação da aplicabilidade do equipamento em diversas condições operacionais. Portanto, o tratamento de efluentes é essencial para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os que visam assegurar água potável e saneamento (ODS 6), proteger a vida aquática (ODS 14) e promover saúde e bem-estar (ODS 3), ao reduzir a poluição hídrica e seus impactos socioambientais.

PALAVRAS-CHAVE: radiação ultravioleta, tratamento de esgoto, efluente sanitário, tecnologias emergentes, projeto de reator.

INTRODUÇÃO

O tratamento de água é um processo essencial para garantir que a água consumida pela população seja segura e livre de contaminantes, mas, caso não seja tratada adequadamente, pode transmitir doenças de veiculação hídrica, principalmente aquelas de origem fecal. Essas doenças são causadas pelo consumo de água contaminada por agentes patogênicos, como bactérias, vírus, protozoários e parasitas. Elas ocorrem principalmente em regiões com saneamento básico inadequado, onde a água pode ser contaminada por esgoto ou resíduos não tratados (FREITAS e FREITAS, 2005; ISMAIL, DI BERNARDO e DANTAS, 2022).

O tratamento de esgoto é um processo fundamental para preservar a saúde pública e proteger o meio ambiente, evitando a contaminação de corpos d'água e do solo. Esse processo consiste na remoção de resíduos e impurezas presentes no esgoto doméstico e industrial, sendo dividido em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. No tratamento preliminar são removidos os sólidos maiores por meio de grades e desaneradores; no tratamento primário os sólidos são separados por meio de processos físicos, como a sedimentação. No secundário, micro-organismos são utilizados para decompor a matéria orgânica, reduzindo a carga poluente. O tratamento terciário, quando necessário, realiza a remoção de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, além de outros poluentes específicos, tornando o efluente mais seguro para ser devolvido ao meio ambiente. A adoção de sistemas de tratamento de esgoto eficazes contribui para a melhoria da qualidade de vida, a preservação dos recursos hídricos e o equilíbrio ecológico (FREITAS e FREITAS, 2005; PELEJA, 2015).

Além do mais, o tratamento de efluentes desempenha um papel fundamental no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Entre os principais objetivos diretamente relacionados a essa prática estão o ODS 6, que visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos; o ODS 3, que busca garantir uma vida saudável e promover o bem-estar; e o ODS 14, que trata da conservação da vida marinha. Ao tratar adequadamente os efluentes, evita-se a contaminação de corpos d'água, reduz-se a proliferação de doenças de veiculação hídrica e minimiza-se o impacto ambiental sobre ecossistemas aquáticos. Além disso, o reaproveitamento de água tratada pode contribuir para o uso mais eficiente dos recursos hídricos, fortalecendo a sustentabilidade hídrica em regiões com escassez. Assim, investir em tecnologias e políticas de tratamento de efluentes é essencial para garantir a saúde pública, a integridade ambiental e o desenvolvimento equilibrado das comunidades.

A utilização da desinfecção por UV é uma técnica eficiente, segura e sustentável utilizada para eliminar micro-organismos presentes na água, como bactérias, vírus e protozoários, por meio da exposição à radiação ultravioleta. Esse processo ocorre quando a luz UV, emitida por lâmpadas específicas, penetra nas células dos micro-organismos e danifica seu material genético, impedindo sua reprodução e, consequentemente, eliminando a contaminação. Ao contrário de métodos químicos, como a cloração, a desinfecção UV não altera o sabor, o odor ou a composição química da água, além de não gerar subprodutos nocivos. Por essas razões, a radiação ultravioleta tem se consolidado como uma alternativa sustentável e eficiente para o tratamento terciário de efluentes, especialmente em sistemas de saneamento que buscam maior segurança sanitária e menor impacto ambiental (ABOU-ELELA, EL-SAYED, EL-GENDY e ABOUTALEB, 2012; BILLOTA e DANIEL, 2012; AGNESINI, 2023).

Em virtude disso, visando desenvolver e aprimorar tecnologias na área de águas residuárias de fácil aplicabilidade, foi desenvolvido um reator de desinfecção por UV flutuante para ser utilizado em lagoas facultativas com o objetivo de remoção de microrganismos, com foco principal na bactéria *Escherichia coli*, uma vez que ela é um dos principais parâmetros de controle da qualidade da água.

OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi o dimensionamento e construção de um reator flutuante de radiação ultravioleta para desinfecção de lagoas facultativas, bem como sua avaliação para remoção de *Escherichia coli*.

METODOLOGIA UTILIZADA

Para realização do estudo, foi dimensionado um reator com lâmpadas UV-C baseado no que foi proposto por SOUZA (2000) com adaptações de acordo com ensaios preliminares.

Para o funcionamento das lâmpadas UV-C foi necessário a construção de uma caixa, 59,5 cm x 13,5 cm x 11 cm, para armazenar os nove reatores (Re 140AFP-P 40W) responsáveis pelo funcionamento das lâmpadas. Cada lâmpada tem capacidade de funcionamento contínuo de 9000 horas.

A Figura 1 apresenta um módulo de três lâmpadas UV-C que foi utilizado na construção do equipamento.

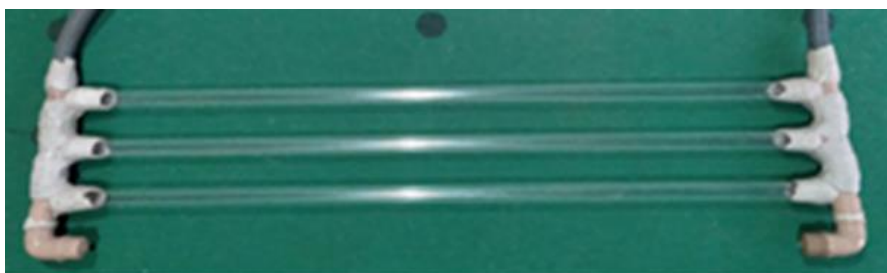


Figura 1: Módulo de três lâmpadas UV-C.

A estrutura modular flutuante utilizada para sustentar o reator possui dimensões de 1,0 m x 1,0 m x 0,42 m, capacidade de carga total de 360 kg e está apresentada na Figura 2.

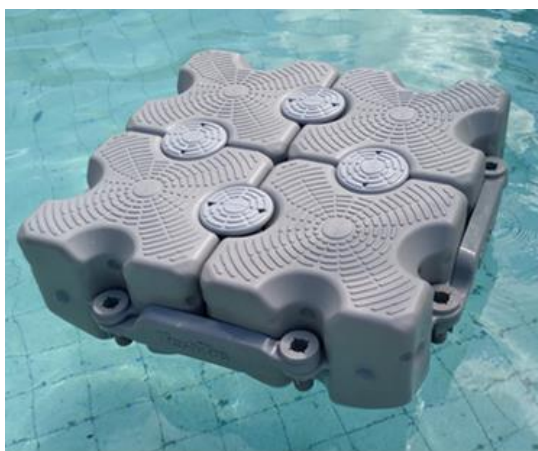


Figura 2: Estrutura modular flutuante.

O reator emissor de radiação ultravioleta ligado fora d'água está apresentado na Figura 3.



Figura 3: Reator de radiação ultravioleta em funcionamento fora d'água.

Na Figura 4 é apresentado o reator de radiação ultravioleta em funcionamento com água em seu interior.

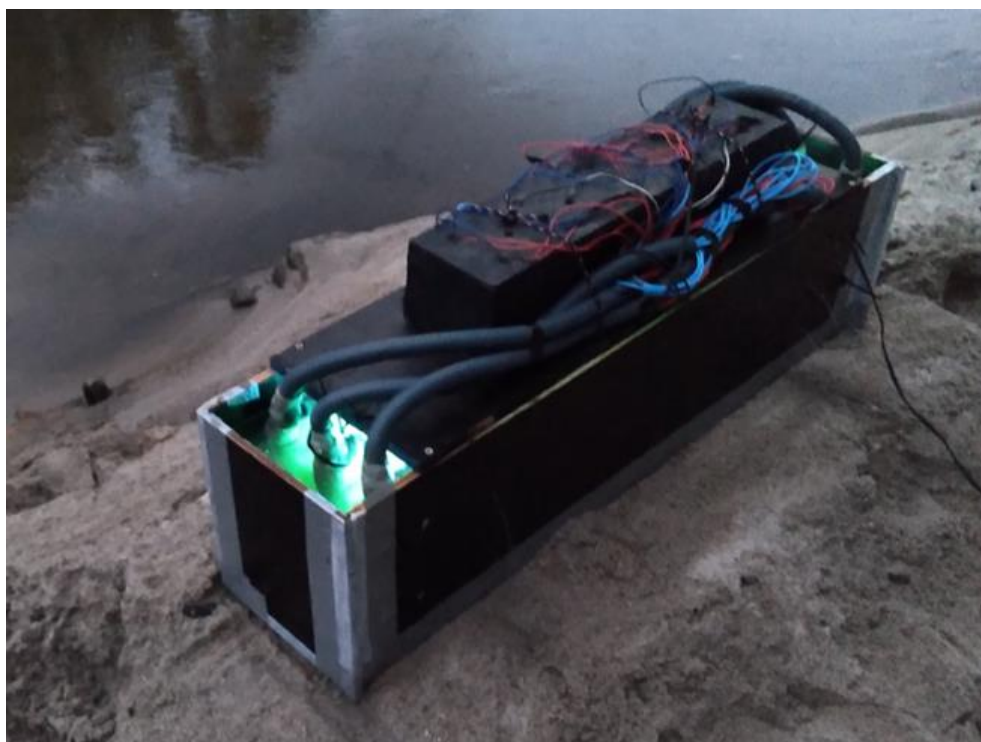


Figura 4: Reator de radiação ultravioleta em funcionamento com água em seu interior.

Após construção do reator, selecionou-se como local de estudo uma ETE de um município localizado no litoral norte do estado de São Paulo. A ETE selecionada está localizada em Lorena – SP, conforme apresentada na Figura 5.



Figura 5: Lagoa facultativa da ETE de Lorena – SP.

A Figura 6 apresenta a configuração da ETE de Lorena. Nota-se que ela possui duas lagoas anaeróbias e duas lagoas facultativas.



Figura 6: Configuração da ETE de Lorena – SP.

Foram realizadas coletadas da água presente na lagoa facultativa da ETE para que fossem transferidas para o reator. As coletas foram feitas na saída das lagoas facultativas, a qual é direcionada para o corpo hídrico receptor, Rio Paraíba do Sul.

A escolha pela saída da lagoa facultativa se deu devido ao objetivo da análise da implantação de um tratamento terciário nesse tipo de tecnologia, aumentando a eficiência do tratamento realizado.

Os procedimentos de coleta, preservação e armazenamento das amostras foram realizados conforme procedimento recomendado pelo laboratório responsável pelas análises.

Os ensaios foram realizados com exposição em diferentes tempos à luz UV e, posteriormente, realizaram-se as análises de *Escherichia coli* pelo teste de Colilert.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma das amostras coletada na saída da lagoa facultativa está apresentada na Figura 7.



Figura 7: Amostra de água coletada na saída da lagoa facultativa.

Nota-se, pela Figura 7, que a água possui uma coloração esverdeada, indicando a presença de algas na lagoa facultativa.

Para determinação dos diferentes tempos de exposição à luz UV, utilizaram-se os dados apresentados na Tabela 1, em que a área da seção utilizada é a área da seção transversal do reator, bem como seu volume útil com diferentes velocidades de escoamento.

Tabela 1: Parâmetros para determinação dos tempos de exposição à luz UV.

Aseção (m ²)	V _{útil} (m ³)	V _{escoamento} (m/s)	Vazão (m ³ /s)	Tempo (s)
0,067	0,057	0,5000	3,36E-02	1,69
		0,0500	3,36E-03	16,88
		0,0050	3,36E-04	168,80
		0,0005	3,36E-05	1688,03

Após determinação dos diferentes tempos de exposição à luz UV, as amostras de água da lagoa facultativa foram transferidas para o interior do reator para determinação da remoção de *Escherichia coli*.

Os ensaios foram realizados em quatro dias distintos, com intervalo médio de 15 (quinze) dias entre eles.

Os dados obtidos nos diferentes tempos de exposição à luz UV em análises distintas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Número Mais Provável obtido para *Escherichia coli* presente nas amostras analisadas em diferentes tempos de exposição à luz UV em dias distintos.

Ensaio	1	2	3	4
Tempo de Exposição (s)	NMP			
0	16000	18000	16000	17000
1,69	3467	3800	3567	3567
16,88	2200	2533	2300	2133
168,80	1600	1800	1633	1633
1688,03	490	490	483	457

De acordo com os dados da Tabela 2, nota-se uma uniformidade em relação aos valores obtidos. Foi possível uma remoção de até 97% da *Escherichia coli* presente inicialmente, em todos os dias em que os ensaios foram realizados.

Em apenas 1,69 segundos é possível uma remoção de até 80% da *Escherichia coli* presente inicialmente na água de estudo, indicando que a maior redução bacteriológica ocorre nos primeiros segundos da exposição à radiação ultravioleta.

Embora o processo inicial de remoção de *Escherichia coli* seja muito rápido, o restante passa por um processo mais lento, uma vez que parâmetros como alta turbidez e cor aparente influenciam negativamente na ação da radiação ultravioleta (BARROSO, 2025).

A eficácia do reator nos primeiros segundos corrobora com os cálculos apresentados por SOUZA (2000), tornando sua capacidade de esterilização extremamente eficiente.

Portanto, o reator de radiação ultravioleta dimensionado para desinfecção de lagoas facultativas apresentou-se com uma grande eficácia na remoção de bactérias presentes, como a *Escherichia coli*, mostrando-se ser uma tecnologia alternativa que pode ser utilizada para redução da carga bacteriológica da água que será lançada no corpo hídrico receptor, colaborando para a preservação do meio ambiente e contribuindo para a saúde pública.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme estudos já realizados, a eficácia da utilização da radiação ultravioleta para redução da carga bacteriológica em água é inegável. No entanto, mesmo estando em um ambiente fora das condições ideais, como no caso de estudo as lagoas facultativas de uma estação de tratamento de esgoto, a utilização do reator dimensionado foi extremamente eficaz.

O reator possui um investimento relativamente baixo e, conforme os dados apresentados, alcançou uma remoção de *Escherichia coli* de 80% em menos de dois segundos e de até 97% em 28 minutos, resultados muito satisfatórios, tornando essa tecnologia uma ferramenta ambiental que vem a contribuir com a qualidade da água lançada nos corpos hídricos receptores pelas lagoas facultativas.

Outro fator que merece destaque é a capacidade de locomoção do equipamento, podendo ser deslocado para qualquer ETE da mesma prestadora de serviços. Sem contar que, devido à sua fluidez, ele pode se locomover em regiões específicas das lagoas e funciona através de energia solar, contribuindo, mais uma vez, para a preservação ambiental.

Sugere-se novos estudos com a utilização do reator dimensionado devido às suas inúmeras possibilidades adaptativas. Entretanto, sua eficiência e facilidade de manuseio e instalação demonstraram-se relevantes, tornando-se uma tecnologia que poderá contribuir para a preservação ambiental e com a saúde pública.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-ELELA, S. I., EL-SAYED, M. M. H., EL-GENDY, A. S., ABOUTALEB, E. M. Comparative study of disinfection of secondary treated wastewater using chlorine UV and Ozone, *Water pollution research department*, Cairo, Egypt, 2012.

AGNESINI, M.V., MARTINEZ, M.S., PISANI JUNIOR, R., PASCHOALATO, C.F.P.R., DANTAS, A.D.B. Y DI BERNARDO, L. Avaliação Da Remoção De Diuron Em Água com Uso de Tecnologias Complementares Associadas ao Tratamento em Ciclo Completo. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 16, 1 (abr. 2023), 1–17. DOI:<https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.79359>.

BARROSO, D. A. Desenvolvimento de um reator de radiação ultravioleta flutuante para desinfecção de Lagoa facultativa. *Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental*. Universidade de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto – SP, 2025.

BILLOTA, P., DANIEL L. A. Utilização de lâmpadas germicidas na desinfecção de esgoto sanitário. *Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 7, n. 1, 2012.

FREITAS, M. B.; FREITAS, C. M. de. A vigilância da qualidade da água para consumo humano – desafios e perspectivas para o Sistema Único de Saúde. *Ciência e Saúde coletiva*. v.10, n.4, p. 993- 1004, 2005.

ISMAIL, I.A.L., DI BERNARDO, L. DANTAS, A.D.B. Avaliação do Adensamento por Gravidade do Lodo gerado pelo Tratamento de Água. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 15, 2 (ago. 2022), 807–830. DOI:<https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79763>.

ISMAIL, I.A.L., PIRES, E.C. Avaliação do Tratamento por Clarificação da Água de Lavagem de Filtros de Estação de Tratamento de Água Convencional. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 15, 2 (ago. 2022), 745–756. DOI:<https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79426>.

PELEJA, J. R. P. Estudo das Condições de Balneabilidade das Praias de Alter do Chão. *Relatório Técnico Científico*, Santarém, Universidade Federal do Oeste do Pará, 2015.

SOUZA, J. B. *Desinfecção de água com cor e turbidez elevadas: comparação técnica de processos alternativos ao cloro empregando radiação ultravioleta e ácido peracético*. 130 p. Universidade de São Paulo, 2000.