



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Sebastián Ignacio Prudencio Peñaranda

Desinfecção do efluente tratado em wetland construído vertical de fundo saturado utilizando radiação solar UV

Florianópolis

2024

Sebastián Ignacio Prudencio Peñaranda

Desinfecção do efluente tratado em wetland construído vertical de fundo saturado utilizando radiação solar UV

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia sanitária e ambiental.

Orientador(a): Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.
Coorientador(a): Eng^a. Thaís Ribeiro, MSc.

Florianópolis

2024

Prudencio Peñaranda, Sebastián Ignacio
Desinfecção do efluente tratado em wetland construído
vertical de fundo saturado utilizando radiação solar UV /
Sebastián Ignacio Prudencio Peñaranda ; orientador, Pablo
Heleno Sezerino, coorientadora, Thais Ribeiro, 2024.
38 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Desinfecção
solar ultravioleta. 3. Wetlands Construídos. 4. Reator
concentrador parabólico. 5. Água de reuso. I. Sezerino,
Pablo Heleno . II. Ribeiro, Thais. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Sebastián Ignacio Prudencio Peñaranda

**Desinfecção do efluente tratado em wetland construído vertical de fundo saturado
utilizando radiação solar UV**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental.

Local ENS/Online, 03 de julho de 2024.

Insira neste espaço
a assinatura

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.
Orientador(a)

Insira neste espaço
a assinatura

Prof^a. Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr^a
Instituição UFSC/ENS

Insira neste espaço
a assinatura

Eng^a. Amanda Silva Nunes, MSc.
Instituição UFSC/ENS

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiro gostaria de agradecer a todas as pessoas que me ajudaram na realização deste TCC. Ao professor Pablo Heleno Sezerino, por me ajudar desde o início neste trabalho, à Thais Ribeiro por toda a ajuda e paciência durante o processo, à Marina Fernandes pela ajuda durante os ensaios, à equipe do GESAD por permitir que eu fizesse parte do seu time e aos membros do laboratório LIMA pela colaboração. Também gostaria de agradecer à professora Maria Eliza Nagel Hassemer por me permitir usar seu reator UV, bem como ao professor Rodrigo de Almeida Mohedano por me permitir usar seu luxímetro durante os ensaios.

Por outro lado, gostaria de agradecer à ENGEES e à UFSC por me permitirem realizar esse programa de duplo diploma.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família e aos meus amigos que me apoiaram durante todo o processo.

RESUMO

Os atuais contextos demográfico e energético, aliados às estações do ano cada vez mais marcadas por eventos climáticos extremos, aumentam a necessidade de sistemas que maximizem o aproveitamento da água e promovam seu reuso. Este estudo buscou avaliar a viabilidade da desinfecção de efluente doméstico tratado em Wetland Construído Vertical de Fundo Saturado (WCV-FS) utilizando radiação solar ultravioleta (UV). O efluente tratado na Solução Baseada na Natureza (SbN) foi disposto em um reator concentrador parabólico (CPC) e exposto a radiação solar UV por 2 horas, 4 horas e 6 horas. Para verificar a eficiência do método de desinfecção, foram realizados testes utilizando a metodologia Colilert para detectar a presença ou ausência de coliformes totais e *Escherichia coli*, antes e depois da exposição do efluente à radiação. Nos casos em que foram detectados microrganismos, foram realizadas contagens para determinar as concentrações respectivas. A exposição de 2 horas reduziu os patógenos em pelo menos 98%, enquanto 4 horas de exposição resultaram em uma redução de 99%. Após 6 horas de exposição, o efluente tratado não apresentou concentrações detectáveis de ambos os microrganismos conforme o teste utilizado. Ao comparar as concentrações com os limites estabelecidos por documentos e normativas brasileiras, verificou-se que os esgotos tratados e submetidos aos três tempos de exposição foram considerados adequados para algum tipo de reuso. O efluente tratado exposto por 6 horas atendeu a todos os limites para coliformes totais e *Escherichia coli*. Portanto, o estudo comprovou que o método de desinfecção solar UV utilizando o reator CPC é eficaz na desinfecção de efluente tratado em WCV-FS, garantindo que a água resultante do processo de desinfecção atenda às normativas brasileiras vigentes e esteja apta para reuso em aplicações urbanas e agrícolas.

Palavras-chave: Desinfecção solar ultravioleta; Wetlands Construídos; Água de reuso; Reator concentrador parabólico; Coliformes Totais; *Escherichia coli*.

ABSTRACT

The current demographic and energy contexts, coupled with seasons increasingly marked by extreme weather events, increase the need for systems that maximize the use of water and promote its reuse. This study sought to assess the feasibility of disinfecting domestic effluent treated in a Saturated Bottom Vertical Constructed Wetland (WCV-FS) using ultraviolet (UV) solar radiation. The effluent treated with the Nature-Based Solution (NBS) was placed in a compound parabolic collector reactor (CPC) and exposed to UV solar radiation for 2 hours, 4 hours and 6 hours. To verify the efficiency of the disinfection method, tests were carried out using the Colilert technique to detect the presence or absence of total coliforms and *Escherichia coli* before and after the effluent was exposed to radiation. Where microorganisms were detected, counts were taken to determine the respective concentrations. Exposure of 2 hours reduced the pathogens by at least 98%, while 4 hours of exposure resulted in a 99% reduction. After 6 hours of exposure, the treated effluent showed no detectable concentrations of either microorganism according to the test used. By comparing the concentrations with the limits established by Brazilian documents and regulations, it was found that the treated water exposed to the three exposure times was considered suitable for at least one type of reuse. The water exposed for 6 hours met all the requirements for both, total coliforms and *Escherichia coli*. Therefore, the study proved that the UV solar disinfection method using the CPC reactor is effective in disinfecting the effluent treated in WCV-FS, ensuring that the water resulting from the disinfection process meets current Brazilian standards and is suitable for reuse in urban and agricultural applications.

Keywords: UV Solar Disinfection; Constructed wetlands; Water reuse; Compound parabolic collector reactor; Total coliforms; *Escherichia coli*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um (a) Wetland Construídos Horizontal (WCH), um (b) Wetland Construído Vertical de Fluxo Livre (WCV) e um (c) Wetland Construído Vertical de Fundo Saturado (WCV-FS).....	6
Figura 2 – Influência dos raios UV no duplo filamento de DNA	11
Figura 3 – Potencial solar absoluto na ilha de Florianópolis.....	14
Figura 4 – Efeitos das partículas de matéria em suspensão na desinfecção por UV.	14
Figura 5 – Reator CPC (a) composto e (b) simples	15
Figura 6– Representação da EETE do GESAD.....	19
Figura 7– Fotografia do WCV-FS.....	20
Figura 8– Reator CPC originalmente (esquerda), durante o processo de reconstrução (centro) e atualmente (direita).....	22
Figura 9– Teste Colilert (a) antes da incubação, com presença de (b) coliformes termotolerantes e (c) <i>Escherichia Coli</i>	23
Figura 10 – Comparação da iluminância com (a) radiação e (b) temperatura do teste com 2 horas de exposição	27
Figura 11 – Comparação da iluminância com (a) radiação e (b) temperatura do teste com 4 horas de exposição	28
Figura 12 – Comparação da iluminância com (a) radiação e (b) temperatura do teste com 6 horas de exposição	28
Figura 13– Comparação das radiações calculadas dos ensaios do dia (a) 10/04/2024 (6 horas de exposição) (b) 23/04/2024 (2 horas de exposição) e (c) 08/05/2024 (4 horas de exposição) com os dados do INMET	29
Figura 14– Comparação da concentração de (a) Coliformes totais e de (b) <i>Escherichia Coli</i> em entrada e na saída do reator em função do tempo de exposição.....	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificações de recomendações de uso dos documentos reguladores para água de reuso.	17
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de microrganismos nas águas tratadas e possíveis usos	17
Tabela 2 – Valores de parâmetros físico-químicos de efluente tratado em WCV-FS21	
Tabela 3 – Dias de realização do teste e respectivos tempos de exposição solar. ...	26
Tabela 4 – Iluminância média e desvio padrão dos valores medidos.....	26
Tabela 5 – Radiação média e desvio padrão dos dados do INMET.....	27
Tabela 6 – Correlação da iluminância com a radiação e a temperatura.....	28
Tabela 7 – Comparação das concentrações com os limites estabelecidos pelas normas	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPC	Coletor parabólico concentrador
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DNA.....	Ácido Desoxirribonucleico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DST	Defined Substrate Technology
EETE	Estação Experimental de Tratamento de Esgoto
GESAD	Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NMP.....	Número mais provável
NT	Nitrogênio total
mNRA.....	RNA Mensageiro
ONU	Organização das Nações Unidas
PROSAB....	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
RNA.....	Ácido Ribonucleico
SbN	Solução baseada na natureza
SODIS	Solar Disinfection
UFSC.....	Universidade Federal de Santa Catarina
UV	Ultravioleta
WC	Wetlands Construídos
WCH	Wetlands Construídos a fluxo horizontal
WCV	Wetlands Construídos a fluxo vertical
WCV-FS	Wetlands Construídos a fluxo vertical com fundo saturado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS	3
2.2	WETLANDS CONSTRUÍDOS	5
2.2.1.1	<i>Macrófitas</i>	7
2.2.1.2	<i>Material filtrante</i>	8
2.2.1.3	<i>Microrganismos</i>	8
2.2.1.1	<i>Mecanismos da desinfecção UV</i>	10
2.2.1.2	<i>Intensidade da radiação</i>	12
2.2.1.3	<i>Medição da iluminância em Florianópolis/SC</i>	13
2.2.1.4	<i>Qualidade do efluente</i>	14
2.2.1.5	<i>Reator UV</i>	15
2.3	NORMATIVA E LEGISLAÇÕES APLICÁVEIS	16
3	METODOLOGIA	19
3.1	ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	19
3.1.1	Wetland construído vertical de fundo saturado	20
3.2	REATOR CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPOSTO (CPC).....	21
3.2.1.1	<i>Luxímetro</i>	22
3.2.2	Teste Colilert	22
3.3	PROTOCOLO DOS EXPERIMENTOS.....	23
3.4	TRATAMENTO DE DADOS	24
3.4.1	Energia solar recebida pelo reator	24
3.4.2	Análise microbiológica	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	ENERGIA SOLAR.....	26
4.2	DESINFECÇÃO	30
4.3	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35
	APÊNDICE A – RESUMO DO TCC EM FRANCÊS (ENGEES)	38
	ANEXO A –TABELA IDEXX QUANTI-TRAY*/2000, NÚMERO MAIS PROVÁVEL	39

1 INTRODUÇÃO

De acordo com as previsões da Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial, atualmente próxima de 8 bilhões, atingirá 9,7 bilhões até 2050 (UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, 2022). Este crescimento pode ser visto como um sinal de potencial econômico e progresso na saúde, já que as condições permitem esse aumento populacional (ROSER; ORTIZ-OSPINA, 2017). No entanto, esse mesmo crescimento apresenta desafios significativos, especialmente sob a ótica da produção de alimentos e do saneamento.

A expansão urbana apresenta desafios significativos ao setor de esgoto, principalmente no que diz respeito ao transporte de efluentes do ponto de geração até as estações de tratamento. Esse processo envolve não apenas complexidades de engenharia, mas também custos substanciais. De acordo com estimativas, entre 80% e 90% do capital investido em sistemas de saneamento é destinado ao transporte de águas residuais (CAPODAGLIO et al., 2017).

Assim, em determinados cenários, a utilização de sistemas centralizados se mostra onerosa, sendo vantajosa a adoção de sistemas de tratamento no lote, como as fossas sépticas e os Wetlands Construídos (WC), esse último sendo uma Solução Baseada na Natureza (SbN) (CAPODAGLIO et al., 2017). Os WC são uma ecotecnologia consolidada para o tratamento de diversos tipos de efluentes, uma vez que apresentam remoções satisfatórias de matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Entretanto, apesar da eficiência, a carga microbiológica na saída permanece elevada (DOTRO et al., 2017).

Desta forma, a desinfecção se torna necessária em situações em que se busca o reaproveitamento do efluente tratado. Entre os métodos de desinfecção disponíveis, a utilização de radiação solar ultravioleta (UV) se destaca por não demandar energia externa ou gerar subprodutos. Esse tratamento possibilita a desinfecção do efluente utilizando somente recursos naturais (CAPODAGLIO et al., 2017).

Assim, com sucesso no processo de desinfecção, o efluente desinfetado, mantendo sua concentração nutricional remanescente, pode ser reutilizado na fertirrigação, limpeza de galerias, ruas e até mesmo como água para combate a incêndio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo submeter efluente tratado em um sistema wetland construído ao processo de desinfecção solar UV utilizando um reator e, assim, avaliar a possibilidade de reuso do material.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade da desinfecção de efluente tratado em Wetland Construído Vertical de Fundo Saturado (WCV-FS) utilizando radiação solar ultravioleta (UV).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar testes de exposição do esgoto tratado à radiação UV para estabelecer intensidade e tempo necessários para alcançar níveis satisfatórios de desinfecção;
- Avaliar a eficácia da radiação solar UV na eliminação de coliformes e *Escherichia coli* utilizando métodos quantitativos;
- Verificar se o efluente tratado e desinfetado atende aos padrões legais e normativos vigentes para reuso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

O saneamento define-se como a série de ações para tornar-se um lugar limpo e habitável, permitindo assim condições para o desenvolvimento de uma população ou para a agricultura (OXFORD UNIVERSITY PRESS, [s.d.]). Portanto, o saneamento, como temática de gestão urbana, abrange diferentes áreas: a gestão de resíduos sólidos, de águas residuais, de águas pluviais e de água potável (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2021).

A gestão de águas residuais é composta por quatro pilares: a captação, o transporte, o tratamento e a descarga final no ambiente natural. Dependendo do contexto, esses diferentes componentes irão variar. Por exemplo, quando existe um sistema centralizado de tratamento de efluentes, o esgoto é coletado e transportado para uma estação de tratamento, sendo posteriormente destinado a um corpo hídrico receptor (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2021).

Já em modelos descentralizados, não há necessidade de transportar o esgoto, pois ele é tratado no próprio local, sendo denominado tratamento no lote ou “on site” (CAPODAGLIO et al., 2017). Em cada um destes contextos existem diferentes tecnologias de tratamento, planejadas e dimensionadas em função do tipo de efluente que será tratado (LAURENT; BOIS; BECK, 2020).

A água residuária pode ser classificada em diferentes grupos dentre os quais: a água negra, a água cinza, e a água amarela (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Água negra, por exemplo, é a água que contém resíduos domésticos, urina e excrementos, caracterizando-se, portanto, por uma elevada carga orgânica e microbiana (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

A água cinza apresenta menor concentração de matéria orgânica e elementos tóxicos, comumente oriundas de pias, chuveiros e máquinas de lavar. Em residências ou instalações onde existe a separação dos tipos de água, a amarela corresponde àquela que contém apenas urina (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Em virtude da não separação das águas nas fontes geradoras, o efluente utilizado neste estudo caracteriza-se como doméstico, sendo formado por todos os tipos de águas.

2.1.1 Etapas de tratamento de águas residuais

O processo de tratamento de águas residuais é composto por etapas distintas, incluindo pré-tratamento ou tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e, em determinadas circunstâncias, tratamento terciário. Quanto mais avançado é a etapa, mais minucioso e polido é o tratamento (LAURENT; BOIS; BECK, 2020).

O pré-tratamento tem como objetivo a remoção de materiais e partículas grosseiras. Essa retenção é importante para evitar prejuízos nas etapas posteriores e danos aos equipamentos. Para tal, o esgoto é submetido a processos exclusivamente mecânicos, como gradeamento e a desarenação (LAURENT; BOIS; BECK, 2020).

No tratamento primário, são retiradas as macromoléculas que não foram retidas durante o pré-tratamento, denominadas como sólidos em suspensão e sólidos sedimentáveis. O principal método utilizado para esse fim é o processo de sedimentação, seja ele químico e/ou físico (LAURENT; BOIS; BECK, 2020).

Após a remoção dos materiais grosseiros, visa-se a eliminação de matéria orgânica em suspensão e a redução da carga molecular, composta por elementos oxidáveis, fosfatados ou nitrogenados, devido à sua significativa influência no ambiente natural. Os processos para a redução destes compostos podem ocorrer de maneira anaeróbia e/ou aeróbia, sendo, portanto, processos bioquímicos (LAURENT; BOIS; BECK, 2020).

Por fim, antes de ser destinado ao fim pretendido, sejam corpos receptores ou a reutilização da água, o efluente tratado pode passar por tratamento terciário. Durante essa fase, são removidos elementos específicos que não foram eliminados nas etapas anteriores, como micronutrientes, metais pesados e patógenos (LAURENT; BOIS; BECK, 2020).

A seleção das etapas e dos métodos de tratamento é determinada pelo tipo de efluente e pelas características ambientais do local do projeto, priorizando determinadas abordagens em detrimento de outros.

2.2 WETLANDS CONSTRUÍDOS

Os Wetlands Construídos (WC) são zonas úmidas construídas artificialmente destinados ao tratamento de águas residuais. São estruturas delimitadas e internamente impermeabilizadas, evitando trocas com o ambiente externo, e podem ser utilizadas em diferentes fases do tratamento, mas principalmente como tratamento secundário.

A ecotecnologia, de modo conceituado, surgiu em meados do século XX sendo inicialmente empregada na Alemanha (VYMAZAL, 2011). Já no Brasil, a utilização do sistema se deu a partir da década de 1980, onde muitos desses sistemas foram implantados como tratamento secundário de efluentes em áreas rurais, após tratamento primário por fossa séptica (SEZERINO; PELISSARI, 2021). Desde então, esta tecnologia tem sido cada vez mais utilizada e estudada para diferentes contextos e tipos de esgoto.

O tratamento via WC consiste na passagem das águas residuais por um substrato, comumente areia e/ou brita, no qual são plantadas macrófitas. A associação desses elementos com a comunidade microbiana formada no meio proporciona processos de tratamento ao efluente, sendo os principais: a filtração, a adsorção, os processos microbiológicos e a assimilação vegetal por fito extração (FINLAYSON; VAN DER VALK, 1995; BUTTON et al., 2015; SEZERINO et al., 2018).

Existe uma grande variedade de WC, que podem ser divididos em escoamento superficial e subsuperficial. Os superficiais podem apresentar macrófitas emergentes, submersas, de folhas flutuantes e flutuantes livres, enquanto os de escoamento subsuperficial utilizam exclusivamente macrófitas emergentes (SEZERINO; PELISSARI, 2021).

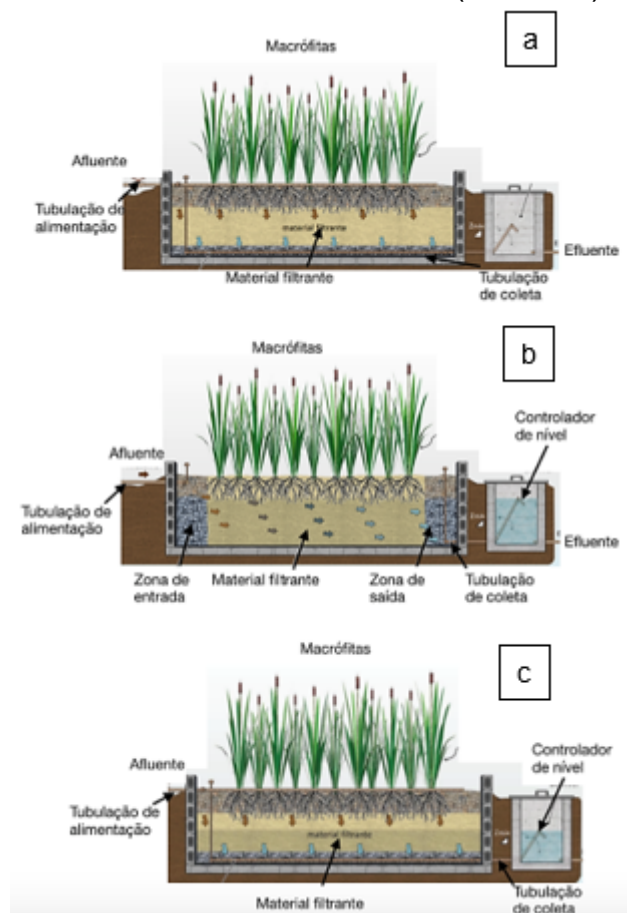
Aqueles com escoamento subsuperficial podem ser um Wetland Construído de Fluxo Vertical (WCV) ou um Wetland Construído de Fluxo Horizontal (WCH) (SEZERINO; PELISSARI, 2021). Em ambos os casos, o efluente é introduzido no sistema por meio de uma tubulação de distribuição fixada em uma extremidade e coletado na extremidade oposta por meio de uma tubulação de saída. Dessa forma, o esgoto é forçado a percolar por todo o material filtrante, garantindo que passe pelos processos de tratamento mencionados.

No caso de WCV, existe a possibilidade de saturar o fundo com o esgoto utilizando um controlador de nível. Esta configuração é denominada Wetland

Construído Vertical de Fundo Saturado (WCV-FS) e proporciona condições aeróbias e anaeróbias dentro de um mesmo sistema. Essa modificação favorece o desenvolvimento de microrganismos anaeróbios, responsáveis, por exemplo, pelo processo de desnitrificação (DOTRO et al., 2017).

As modalidades de WC de escoamento subsuperficial mencionadas estão ilustradas abaixo na Figura 1.

Figura 1 – Representação de um (a) Wetland Construídos Horizontal (WCH), um (b) Wetland Construído Vertical de Fluxo Livre (WCV) e um (c) Wetland Construído Vertical de Fundo Saturado (WCV-FS).



Fonte: adaptado de SEZERINO et al., 2018.

Este tipo de tratamento se apresenta vantajoso do ponto de vista econômico e técnico, especialmente quanto à operação, visto que os custos são menores quando comparados aos métodos tradicionais de tratamento. Aspectos que contribuem para este baixo custo são: tratamento por processos físico-químicos e biológicos sem aplicação de energia externa, implantação do sistema próximo a fonte geradora de esgoto, não sendo necessário transporte até uma estação de tratamento centralizada,

além da facilidade na operação e baixa manutenção (SEZERINO; PELISSARI, 2021; CAPODAGLIO et al., 2017).

2.2.1 Elementos atuantes no tratamento

A eficácia do tratamento depende de três elementos atuantes fundamentais, sendo: a macrófita, o material filtrante e os microrganismos.

2.2.1.1 *Macrófitas*

Macrófitas são definidas como vegetação aquática macroscópica visível a olho nu (REJMANKOVA, 2011). Estas desempenham um papel essencial nas zonas úmidas, tanto nas naturais, sendo produtoras primárias, como nas construídas, desempenhando um papel importante no tratamento da água residual (REJMANKOVA, 2011; SEZERINO et al., 2018).

A eficiência do tratamento através das plantas depende da absorção de nutrientes pelo sistema radicular das mesmas. Os nutrientes presentes nas águas residuais promovem o crescimento da macrófita devido às características autotróficas destas plantas. Outro aspecto fundamental é a energia solar, visto que além de auxiliar no processo de fotossíntese também possibilita a ocorrência da evapotranspiração (REJMANKOVA, 2011).

Diferentes espécies de macrófitas podem ser empregadas no tratamento, a escolha da espécie é determinada pelo local de instalação do WC, pelo clima da região e pelo tipo de esgoto a ser tratado na unidade em questão.

Além disso, deve-se destacar que dependendo da macrófita do sistema, modificações podem ser notadas, isto pois as raízes possuem a capacidade de deslocar o substrato à medida que crescem, alterando, desta forma, a porosidade e sua permeabilidade (SEZERINO; PELISSARI, 2021). Ademais, as raízes servem como suporte para microrganismos, contribuindo para o seu desenvolvimento e estabelecimento da rizosfera.

2.2.1.2 Material filtrante

Do ponto de vista físico, o substrato determina a velocidade de escoamento do fluido ao passo que atua como filtro, retendo materiais grosseiros. Dessa forma, o diâmetro, a uniformidade e o tipo do material escolhido para compor o substrato é de suma importância, devendo permitir boa permeabilidade hidráulica e potencial de adsorção. Caso o diâmetro seja muito pequeno, a água residual infiltrará mais lentamente e o meio filtrante terá maior tendência a colmatação devido às partículas retidas e ao conseqüente aumento da espessura do biofilme formado (KNOWLES et al., 2011; SEZERINO; PELISSARI, 2021).

Além da filtração, outro processo de tratamento que o meio filtrante possibilita é a adsorção de partículas poluentes e contaminantes. O meio filtrante também proporciona sustentação às macrófitas, que absorvem nutrientes, e a aderência de microrganismos à superfície e aos poros do material, formando, juntamente com a matéria orgânica, biofilmes.

2.2.1.3 Microrganismos

Assim como em muitos reatores para tratamento de águas residuais, os microrganismos também realizam um importante papel na degradação da matéria orgânica nos WC. Devido ao seu metabolismo, esses microrganismos são capazes de reduzir significativamente a carga poluente das águas residuais (SEZERINO; PELISSARI, 2021).

Conforme descrito anteriormente, os microrganismos desenvolvem-se tanto na superfície do substrato quanto no interior do maciço filtrante, formando biofilmes (SEZERINO; PELISSARI, 2021). De maneira semelhante, microrganismos se desenvolvem nas proximidades e nas raízes das macrófitas, criando a rizosfera e promovendo uma simbiose entre os componentes do sistema (DOTRO et al., 2017).

Assim, quando o esgoto é introduzido no WC, entra em contato com esses microrganismos, que capturam os nutrientes necessários, degradam a matéria orgânica e facilitam os processos de adsorção de partículas e absorção de nutrientes pelas macrófitas. Esse conjunto de interações biológicas e físico-químicas resulta na redução da carga orgânica e nutricional, contribuindo para o tratamento eficiente do efluente (DOTRO et al., 2017).

2.2.1 Wetland Construído Vertical de Fundo Saturado

Wetlands Construídos Verticais de Fundo Saturado (WCV-FS) são sistemas modificados através de um controlador de nível fixado na saída do sistema, permitindo a saturação de uma determinada altura do meio filtrante. Essa modificação possibilita que os processos de nitrificação e desnitrificação ocorram em um único módulo de WC.

Assim, na zona insaturada do sistema, uma maior concentração de microrganismos aeróbios irá se desenvolver. Esses microrganismos, especialmente as bactérias *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, possuem a capacidade de realizar a nitrificação de nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+) através da oxidação da amônia, a convertendo inicialmente em nitrito (NO_2^-) e posteriormente em nitrato (NO_3^-) (DOTRO et al., 2017).

Na zona saturada, os microrganismos predominantes são os anaeróbios. Esses possuem a capacidade de realizar o processo de desnitrificação, que consiste na conversão de nitrato em nitrogênio molecular (N_2) (DOTRO et al., 2017).

Conseqüentemente, ao proporcionar condições de nitrificação e desnitrificação, esse modelo de wetland construído possui a capacidade de remover nitrogênio total do esgoto tratado.

2.3 DESINFECÇÃO

A desinfecção é definida como o processo de eliminação de microrganismos patogênicos, seja por destruição ou apenas remoção, por meio da utilização de agentes químicos ou físicos (DYMACEWSKI et al., 2020). De acordo com o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), a desinfecção consiste na remoção ou inativação de organismos potencialmente patogênicos, garantindo a segurança e a qualidade microbiológica dos ambientes e recursos tratados (CONAMA, 2005).

Os agentes químicos de desinfecção incluem íons metálicos, ácidos, alcalinos, surfactantes e oxidantes, entre os quais os mais utilizados são o cloro, o ozônio e o peróxido de hidrogênio nas reações de Fenton. Entre os agentes físicos utilizados, destacam-se o calor, a radiação gama e a luz, seja por meio da radiação ultravioleta solar ou artificial (CHANG, 1971).

Independentemente do agente de desinfecção utilizado, os mecanismos envolvidos abrangem a destruição da estrutura celular, a inativação de enzimas e a interferência na biossíntese e na síntese de proteínas. A eficiência da desinfecção é avaliada pela oxidação ou ruptura da parede celular dos microrganismos patogênicos, resultando na sua inativação ou morte (DIAS, 2001).

No tratamento da água, seja para a produção de água potável ou para a desinfecção de águas residuais, podem ser utilizados diferentes métodos. Entre os métodos físicos, encontram-se os nanofiltros, que permitem a remoção de microrganismos do líquido a ser tratado. No entanto, esses filtros têm alto custo e podem colmatar rapidamente (LAURENT; BOIS; BECK, 2020).

Em relação aos tratamentos químicos, a cloração é um dos métodos mais utilizados. O cloro é amplamente empregado devido ao seu baixo custo e à sua eficácia na eliminação de microrganismos. No entanto, o uso excessivo de cloro pode trazer várias consequências: na água potável, acredita-se que possa ter efeitos adversos na saúde (NOZAIC, 2004).

Dessa forma, uma alternativa a estes métodos é a utilização de desinfecção ultravioleta (UV), que consegue inativar os patógenos ao passo que não gera subprodutos.

2.3.1 DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

A radiação ultravioleta (UV) compreende a faixa do espectro eletromagnético situada entre 100 e 400 nm e sua divisão é classificada em vácuo UV (100 a 200nm), UV-C (200 a 280nm), UV-B (280 a 315nm) e UV-A (315 a 400nm) (MARTINS, 2021).

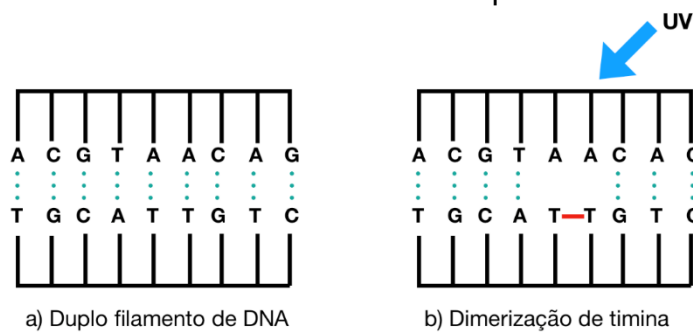
De acordo com Malley (2012), apesar da radiação UV ser utilizada desde meados da década de 1830, foi apenas em 1910 que seu uso como meio de desinfecção da água começou a ser explorado, motivado, principalmente, pelo alto custo do cloro.

2.2.1.1 *Mecanismos da desinfecção UV*

A desinfecção por radiação UV opera por meio de mecanismos bioquímicos e se baseia principalmente na capacidade de induzir mutações no DNA e RNA de microrganismos patogênicos.

Neste processo, a radiação UV incide sobre o DNA da célula, provocando alterações na sequência da timina (T), uma das quatro bases nitrogenadas do DNA (PEYCRU et al., 2019; MARTINS, 2021). Dessa forma, a timina, antes ligada à base adenina (A), ao receber energia da radiação, passa por processo de fotólise, interrompendo a ligação e formando um dímero, ligação entre timinas adjacentes. Esse processo resulta em uma mutação no DNA e pode ser observado de modo simplificado abaixo na Figura 2 (YAMAMOTO et al., 2013).

Figura 2 – Influência dos raios UV no duplo filamento de DNA



Fonte: Adaptado de Queluz, Alves e Sánchez-Román (2014)

A formação do dímero de timina induzida pela radiação UV ocasiona uma distorção estrutural no DNA, o que interfere significativamente na capacidade da enzima RNA polimerase em replicá-lo com precisão. Essa alteração estrutural dificulta a transcrição do DNA em mRNA, podendo resultar em mutações genéticas ou interrupção na síntese proteica. Como consequência, ocorrem modificações no metabolismo celular, podendo ser letal à célula e ao organismo (MARTINS, 2021; YAMAMOTO et al., 2013).

Assim, quanto maior a absorção pelos nucleotídeos, e consequentemente pelas bases nitrogenadas, mais eficaz será o tratamento. O pico de absorção dessas moléculas situa-se na faixa de comprimento de onda entre 100 nm e 280 nm, com destaque para a eficiência de morte bacteriana em 260 nm, ou seja, na região de UV-C (DIAS, 2001; MARTINS, 2021).

É importante ressaltar que, embora a reação de modificação da timina ocorra principalmente na região especificada, ela também pode ser induzida por raios UV-A, não sendo necessário atingir 260 nm para uma desinfecção satisfatória (DOUKI et al., 2007).

As principais variáveis que podem influenciar o processo de desinfecção por radiação UV são: a intensidade da irradiação, o tipo de reator, as características e origem das águas residuárias, o volume a ser tratado e o tempo de permanência do material no interior do reator (SCHEIBLE, 1987).

No entanto, ressalta-se que a realização destas reações requer condições específicas. Como citado anteriormente, os espectros de radiação UV não são igualmente eficazes e a resposta das diferentes espécies de bactérias ao tratamento pode variar (MARTINS, 2021; MALLEY, 2012).

2.2.1.2 *Intensidade da radiação*

Atualmente, existem reatores que utilizam raios solares UV, bem como aqueles que dependem de fontes artificiais de radiação. A técnica que não utiliza fonte artificial é conhecida como SODIS (do inglês, “Solar Disinfection”) e é amplamente empregada em países com acesso limitado à água potável (MCGUIGAN et al., 2012).

Reatores equipados com fontes próprias de radiação UV apresentam como principal vantagem a capacidade de realizar desinfecção contínua a qualquer momento do dia. Entretanto, o elevado custo torna essa tecnologia onerosa e não aplicável a determinadas situações. Por outro lado, reatores que utilizam radiação solar UV, embora dependam das condições climáticas, apresentam um baixo custo de operação, pois utilizam uma fonte inesgotável e sustentável de energia (MARTINS, 2021).

Devido à dependência da radiação solar, torna-se essencial quantificar essa variável, bem como identificar os intervalos de tempo em que o tratamento é mais eficaz. Em óptica, existem diferentes parâmetros pelos quais uma fonte de luz pode ser caracterizada. Estes são fluxo luminoso, intensidade e iluminância (BLEVIN, STEINER, 1975).

O fluxo luminoso pode ser definido como a potência emitida por uma fonte em todas as direções. Isso pode ser concebido como quantidade de energia por segundo que passa por uma superfície esférica cujo núcleo é a fonte de luz (BLEVIN, STEINER, 1975). A unidade é o lúmen (lm).

Já a intensidade luminosa pode ser definida como o fluxo luminoso que passa por um ângulo sólido. Em outras palavras, é a capacidade de uma fonte de luz enviar

luz em uma direção. Assim, a intensidade pode variar dependendo da direção (BLEVIN, STEINER, 1975). A unidade de intensidade da luz é a candela (cd).

Por fim, a iluminância é definida como o fluxo que passa através de uma determinada superfície. A unidade é o lux (lx).

2.2.1.3 *Medição da iluminância em Florianópolis/SC*

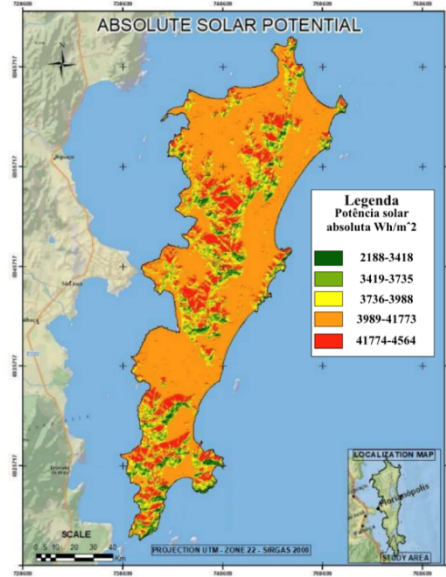
Comumente, a iluminância é medida por um luxímetro. Esse equipamento opera com base no funcionamento de um fotodiodo presente no seu sensor. Os fotodiodos utilizam a energia luminosa, que é convertida em corrente elétrica. Dependendo da intensidade da exposição luminosa, essa corrente será mais ou menos significativa, permitindo assim a medição da intensidade da luz. O tipo de fotodiodo mais utilizado é o de silício, devido ao seu baixo custo.

A intensidade da luz solar varia nas diferentes regiões do Brasil, visto que as regiões Norte e Nordeste estão mais próximas à Linha do Equador, enquanto a região Sul, por exemplo, está mais afastada e, desta forma, recebe uma quantidade menor.

O leste de Santa Catarina, estado da região Sul, possui a menor taxa média de irradiação do país, variando entre 4.500 Wh/m² e 4.700 Wh/m² (PEREIRA, 1998). Florianópolis/SC, por sua vez, apresenta variabilidade de insolação em seu território, como pode ser visto abaixo na Figura 3.

O campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) está localizado em uma área onde a média anual de irradiação em 2019 variou entre 3.903 Wh/m² e 4.152 Wh/m² (REGINATO, 2020).

Figura 3 – Potencial solar absoluto na ilha de Florianópolis.

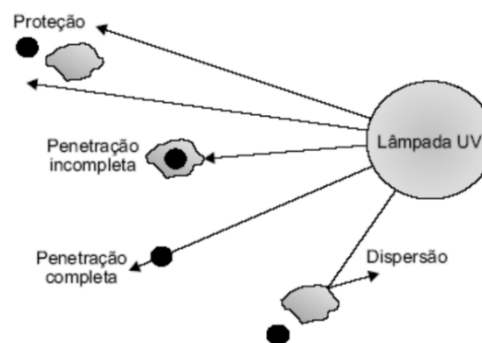


Fonte: adaptado de REGINATO, 2020

2.2.1.4 Qualidade do efluente

As águas residuais frequentemente contêm uma quantidade significativa de sólidos em suspensão, e esses sólidos desempenham um papel coadjuvante no desenvolvimento de bactérias. No entanto, caso essas partículas sejam capazes de absorver os raios UV, conforme ilustrado na Figura 4, atuam como agentes protetores contra a radiação luminosa (DARBY; SNIDER; TCHOBANOGLIOUS, 1993).

Figura 4 – Efeitos das partículas de matéria em suspensão na desinfecção por UV



Fonte: MARTINS, 2021.

Dessa forma, um tratamento que reduz a concentração desses sólidos em suspensão antes da desinfecção pode aprimorar a eficácia do processo.

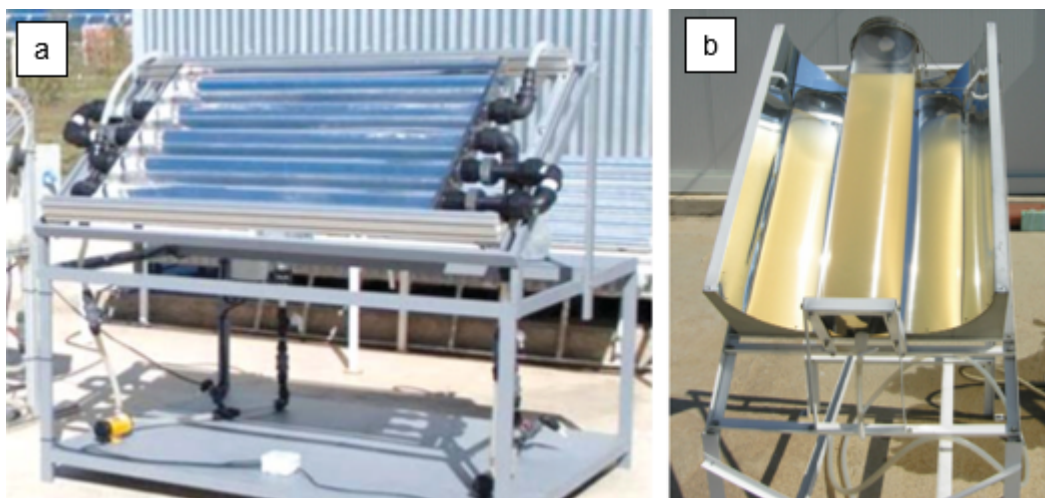
2.2.1.5 Reator UV

Em termos gerais, os reatores possibilitam a exposição do efluente à radiação. Existem duas configurações principais: na primeira, o efluente é disposto em tubulações translúcidas e fica exposto à incidência da radiação solar; na segunda, lâmpadas UV são instaladas próximas e, em alguns casos, no interior das tubulações por onde o efluente circula (MARTINS, 2021).

Na segunda configuração, é permitido o uso exclusivo de luz artificial. Em contraste, na primeira configuração, podem ser utilizadas tanto fontes de luz natural quanto lâmpadas UV. Este estudo focou-se especificamente nos reatores SODIS, que utilizam fontes naturais de luz, ou seja, radiação solar.

Entre os tipos de reatores solares, o mais empregado é o reator Coletor Parabólico Concentrador (CPC), podendo ser composto ou de linha simples, conforme exposto abaixo na Figura 5.

Figura 5 – Reator CPC (a) composto e (b) simples



Fonte: adaptado de MCGUIGAN et al., 2012; UBOMBA-JASWA et al., 2009.

Os reatores CPC possuem uma estrutura côncava ao redor dos tubos, geralmente feita de metal com alta capacidade refletiva. Essa estrutura tem a função de concentrar a radiação recebida no centro, onde estão localizados os tubos que comportam efluente. Dessa forma, aumenta-se a exposição do efluente à radiação, concentrando os raios solares e, conseqüentemente, captando energia de forma térmica (BLANCO; MALATO, 2009).

Para maximizar a eficiência na desinfecção, os tubos devem ser constituídos de materiais que causem mínima interferência na captação da radiação, uma vez que a transmitância está diretamente relacionada ao material a ser atravessado. Por essa razão, é comumente utilizado borossilicato ou outros materiais de características semelhantes, incluindo alta transparência e baixa absorção de radiação.

A variação na transmitância também pode ser atribuída aos elementos presentes no material, como no caso do vidro. A presença dos íons Fe^{3+} e Pb^{2+} reduz a transmitância devido à sua elevada capacidade de absorver os raios UV. Além disso, a basicidade do vidro pode contribuir para a diminuição da transmitância UV (DUFFY, 2001).

Outro fator a ser considerado é o diâmetro dos tubos. Em tubos de maiores diâmetros, a radiação, mesmo quando concentrada, enfrentará dificuldades para alcançar o centro devido à maior concentração de sólidos em suspensão e à influência da própria água, comprometendo, assim, o processo de desinfecção.

2.3 NORMATIVA E LEGISLAÇÕES APLICÁVEIS

No Brasil, existem normativas e legislações que abordam a possibilidade de reutilização de efluentes tratados. Para que a água de reuso seja considerada apta, foram estabelecidos diversos parâmetros e critérios. Dependendo dos critérios atendidos, diferentes usos são recomendados.

Dentre tais documentos nacionais, destacam-se aqueles que estabelecem limites microbiológicos de coliformes totais, coliformes termotolerantes e/ou *Escherichia coli*: Programa Interáguas (2017), NBR 13.969:1997, NBR 16.783:2019 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997; 2019). Além desses, o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) também cita limites e indica usos.

Os critérios microbiológicos estabelecidos pelos documentos citados, assim como os respectivos usos, estão dispostos abaixo na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de microrganismos nas águas tratadas e possíveis usos

Documento	Uso	Limites microbiológicos (NMP/100mL)		
		Coliformes Totais	Coliformes Fecais	<i>Escherichia coli</i>
Programa Interáguas	Agrícola irrestrito	<10		
	Agrícola restrito	<10 ³		
	Urbano irrestrito	<10		
	Urbano restrito	<10 ³		
NBR 13969/1997	Classe 1		<200	
	Classe 2		<500	
	Classe 3		<500	
	Classe 4		<5000	
NBR 16783/2019	Diverso			≤200
PROSAB	Agrícola irrestrito	≤ 10 ³		
	Agrícola restrito	≤ 10 ⁴		
	Urbano irrestrito	≤ 200		
	Urbano restrito	≤ 10 ⁴		
	Uso predial	≤10 ³		

Fonte: adaptado de Programa Interáguas (2017), ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997; 2019), BASTOS et al. (2008)

Quanto às classificações de recomendação de uso proposta pelos documentos citados, estas estão especificadas abaixo no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificações de recomendações de uso dos documentos reguladores para água de reuso (continua).

Documento	Classificação e Uso
Programa Interáguas (2017)	Agrícola irrestrito: irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve rente ao solo sem processamento prévio, como hortaliças e tubérculos (alface, morango, cenouras, etc.), culturas hidropônicas.
	Agrícola restrito: irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve distante do solo sem processamento prévio (como milho, batatas, arroz) ou após processamento prévio; não destinadas ao consumo humano; cultivo de florestas plantadas.
	Urbano irrestrito: irrigação paisagística, bacias sanitárias e lavagem de logradouros.

Fonte: Adaptado de Sousa (2023)

Quadro 2 - Classificações de recomendações de uso dos documentos reguladores para água de reuso (continuação).

Documento	Classificação e Uso
Programa Interáguas (2017)	Urbano restrito: irrigação paisagística em áreas restritas (como em rodoviárias, cemitérios, centro comerciais) e outros usos urbanos, tais como desobstrução de redes de esgoto, construção civil, lavagem de veículos e combate a incêndio.
NBR 13.969/1997	Classe 1: Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes.
	Classe 2: Lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.
	Classe 3: Descargas de bacias sanitárias
	Classe 4: Pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.
NBR 16.783/2019	Descarga de vaso sanitário; lavagem de logradouros, pátios, garagens e áreas externas; lavagem de veículos; irrigação paisagística; uso ornamental (fontes, chafarizes e lagos), arrefecimento de telhados, sistemas de resfriamento a água.
PROSAB (Bastos et al., 2008)	Agrícola irrigação irrestrita: qualquer cultura, hidropônico e consumidas cruas.
	Agrícola irrigação restrita: hidropônico e qualquer cultura não ingerida crua, culturas alimentícias e não alimentícias, forrageiras, pastagens e árvores.
	Urbano irrestrito: irrigação (campos de esporte, parques, jardins e cemitérios), usos ornamentais e paisagísticos em áreas com acesso irrestrito ao público e limpeza de ruas.
	Urbano restrito: irrigação (parques, canteiros de rodovias), usos ornamentais e paisagísticos em áreas com acesso controlado ou restrito ao público, abatimento de poeira em estradas vicinais, usos na construção civil.
	Uso predial: Descarga de vaso sanitário.

Fonte: Adaptado de Sousa (2023)

Ainda no que diz respeito à legislação, outros documentos citam o reuso da água tratada. A Lei nº 11.445 de 2007 (Lei do Saneamento Básico), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, cita em seu Art. 2º, que os serviços públicos de saneamento básico deverão ser prestados com base em princípios fundamentais, dentre os quais é citado o estímulo e fomento ao reuso de efluentes sanitários (BRASIL, 2007).

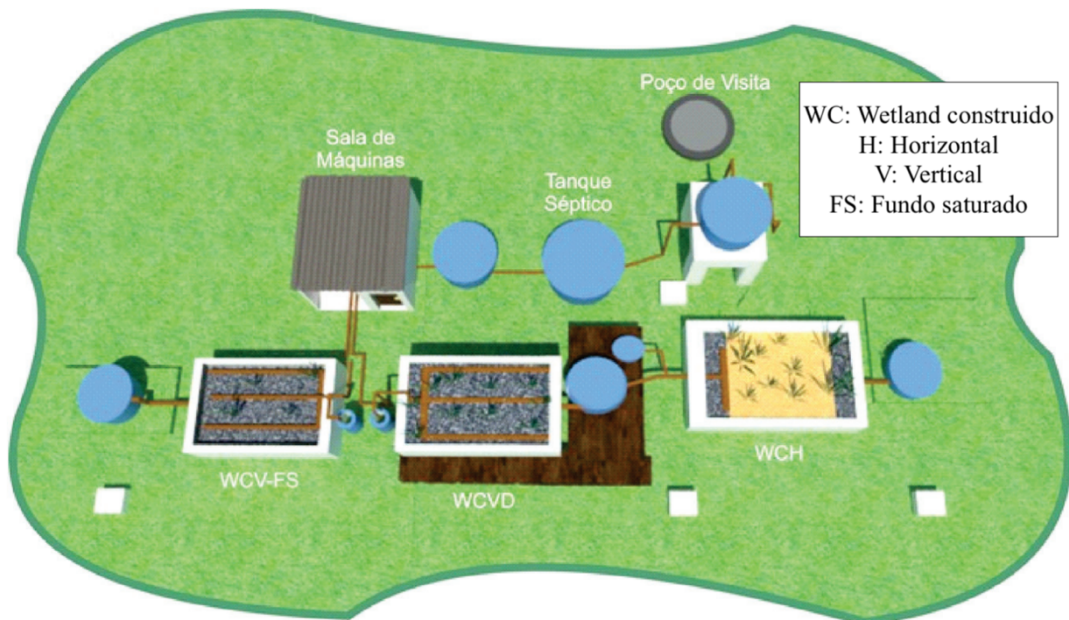
Já a Lei nº 14.546 de 2023, que altera a Lei de Saneamento Básico, tem como intuito estabelecer medidas de prevenção a desperdícios, de aproveitamento das águas de chuva e de reuso não potável das águas cinzas (BRASIL, 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE TRATAMENTO DE ESGOTO

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Tratamento de Esgoto (EETE) do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), localizada no campus da Universidade Federal de Santa Catarina, situada em Florianópolis, nas coordenadas geográficas 27°36'12.64"S e 48°31'14.43"O e representada abaixo na Figura 6.

Figura 6– Representação da EETE do GESAD.



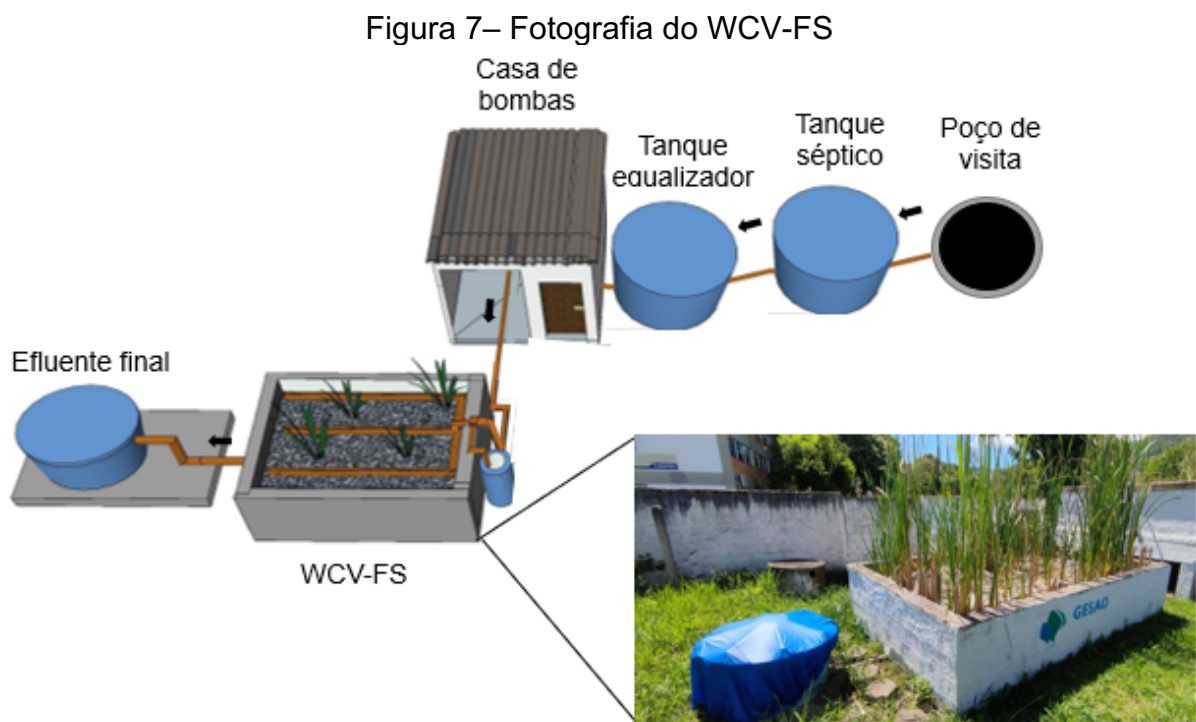
Fonte: Adaptado de SEZERINO et al., 2018.

O esgoto tratado na estação é bombeado da rede coletora para um reservatório e, em seguida, é conduzido por gravidade ao tanque séptico, unidade responsável pelo tratamento primário. Posteriormente, o efluente é direcionado a um tanque equalizador e, então, bombeado aos WC.

Na estação existem dois sistemas de tratamento: o primeiro é um WCV-FS, utilizado neste estudo, e o segundo é um sistema híbrido, compreendendo um WCV-FS seguido de um WCH. Cada sistema foi dimensionado para tratar o efluente gerado pelo equivalente populacional de cinco pessoas, com taxa hidráulica aplicada de 65mm/d², carga orgânica aplicada de 40g.DQO/m².d e ciclos de alimentação e repouso de 3,5 dias na semana e 3 a 4 pulsos por dia (SEZERINO et al., 2018).

3.1.1 Wetland construído vertical de fundo saturado

Para a realização deste estudo foi utilizado o WCV-FS. Este sistema é alimentado por três tubos distribuídos paralelamente, conforme ilustrado na Figura 7, e perfurados para permitir a distribuição do efluente na superfície superior do reator. Após a passagem do esgoto pelo maciço filtrante o efluente é coletado ao fundo do reator e direcionado novamente a rede coletora municipal.



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

O WCV-FS, representado na Figura 7, tem uma superfície de 7,5 m² e altura do meio filtrante de 0,75m. O substrato é composto por duas camadas de brita separadas por uma de areia grossa ($d_{10}=0,29$ mm e $d_{60}=1,16$ mm). A macrófita utilizada é a *Typha domingensis*, uma angiosperma monocotiledônea com boa capacidade de adaptação a diferentes pH e salinidade extrema (MARNOTTE; CARRARA, 2006; MUFARREGE et al., 2011).

Como monitoramento da qualidade do efluente tratado são realizadas análises na entrada e na saída do sistema. Os parâmetros aferidos são: pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST), Nitrogênio Total (NT),

Nitrogênio Amoniacal, Nitrato, Nitrito e Fósforo ortofosfato seguindo recomendações do Standart Methods (2005) e Vogel (1981). Os valores médios do efluente tratado no WCV-FS encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios de parâmetros físico-químicos medidos no efluente tratado em WCV-FS ao longo do período de 108 meses (124 amostragens)

Parâmetro	Valor	N° de amostras
pH	6,33	109
DQO (mg/L)	35	115
SST (mg/L)	1,4	117
NT (mg/L)	43	78
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	18	123
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	24	117
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,1	122
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	7	124

Fonte: GESAD (2024)

3.2 REATOR CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPOSTO (CPC)

O reator CPC, representado na Figura , utilizado para tratamento com radiação ultravioleta, foi recuperado de experimentos anteriores realizados por Justino (2016) durante seu estudo sobre o tratamento de efluentes da indústria têxtil utilizando o processo foto-Fenton.

Os tubos do reator são feitos de borossilicato, cada um medindo 1,25m de comprimento, com uma espessura de 8mm e um diâmetro interno de 48,2mm. Estes tubos são interconectados por dois cotovelos de PVC com ângulo de 90°, permitindo o fluxo contínuo entre eles. O reator possui um sistema de inclinação que possibilita ajustes angulares em 0°, 30°, 45°, 60° e 75°. Os refletores são fabricados em alumínio e possuem uma forma de involuta.

Figura 8– Reator CPC originalmente (esquerda), durante o processo de reconstrução (centro) e atualmente (direita)



Fonte: elaborado pelo autor (2024) e JUSTINO (2016).

Para os experimentos realizados neste estudo, quatro tubos foram preenchidos manualmente com um total de 10 litros de efluente tratado em WCV-FS e a angulação foi mantida em 30°.

3.2.1.1 Luxímetro

Nesse estudo, foi utilizado um luxímetro para medir a variação da intensidade da radiação solar durante os experimentos. Especificamente, foi empregado um luxímetro da marca Testo 545, modelo nº 0560 0545, equipado com sensor de silício.

3.2.2 Teste Colilert

A análise de desinfecção foi realizada utilizando indicadores comumente empregados para avaliar a qualidade da água, especificamente a presença de coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*. Para tal, foi utilizado o método enzimático Colilert da IDEXX, que permite determinar a presença ou ausência desses microrganismos, bem como estimar o Número Mais Provável (NMP).

O procedimento do teste consiste em utilizar uma amostra de 100mL de amostra à qual é adicionado o reagente Defined Substrate Technology (DST). Este reagente contém substratos que reagem com enzimas bacterianas, alterando suas atividades metabólicas. Após a homogeneização do reagente com a amostra, a mistura é vertida em uma cartela Quanti-tray 2000 (como mostrado abaixo na Figura 9a), que é então selada e incubada por 24 horas em estufa a 35°C.

Figura 9 – Teste Colilert (a) antes da incubação, com presença de (b) coliformes termotolerantes e (c) *Escherichia Coli*



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Após o processo de incubação, a leitura dos resultados é realizada em duas etapas. Primeiramente, conta-se o número de células grandes e pequenas que apresentam coloração amarela (Figura 9b). A interseção entre o número de células grandes e pequenas na tabela apresentada no Anexo A fornece o NMP de coliformes em 100 mL.

Posteriormente, a cartela é exposta a uma lâmpada de luz UV, e faz-se a contagem dos quadrados que reagem à luz (Figura 9c). Utilizando a mesma tabela do Anexo A, determina-se o NMP de *Escherichia Coli* em 100 mL.

3.3 PROTOCOLO DOS EXPERIMENTOS

O experimento consistiu em submeter o efluente tratado por um sistema WCV-FS à radiação solar em um reator UV por diferentes períodos, a saber: 2 horas, 4 horas e 6 horas, sendo o horário do meio-dia definido como o ponto intermediário de cada experimento para garantir exposição à radiação de maior intensidade. Esses tempos foram escolhidos imperativamente.

Durante a realização dos testes, foram medidos valores de luminosidade a cada 15 minutos, a partir da programação prévia do luxímetro.

Quanto as análises microbiológicas, em cada rotina de teste foi coletada uma amostra do efluente antes e outra após o processo de desinfecção. Todas as amostras foram submetidas ao teste Colilert para determinar presença ou ausência de coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*. E em caso de presença, foi realizada a determinação do NMP.

3.4 TRATAMENTO DE DADOS

3.4.1 Energia solar recebida pelo reator

Utilizando os valores brutos coletados foi possível calcular a potência por área utilizando a seguinte relação:

$$P_m = \frac{E}{K} \quad (1)$$

Sendo P_m a potência por metro quadrado recebida (em W/m^2), E a iluminância (em lx), e K a eficácia média do sol (em lm/W).

Além disso, ao calcular a área superficial dos tubos do reator e conhecendo a frequência de coleta dos dados, foi possível calcular a energia total recebida para cada experimento. O objetivo dessa etapa foi comparar a capacidade de desinfecção em função da energia total recebida durante o ensaio.

Para confirmar os valores obtidos, estes foram comparados com os dados de uma estação meteorológica automática localizada na região metropolitana de Florianópolis/SC. Os dados de radiação e temperatura utilizados para essa comparação foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

3.4.2 Análise microbiológica

Após a quantificação e contagem dos microrganismos resultantes do processo de desinfecção, os valores obtidos foram comparados aos critérios estabelecidos nas normas e legislações pertinentes, visando verificar se a qualidade do efluente, em termos de contaminação microbiológica, atende aos requisitos legais e identificar os possíveis usos adequados para esse efluente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENERGIA SOLAR

Foram realizados testes de desinfecção solar UV com tempos de duração de 2h, 4h e 6h nos dias, conforme dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Dias de realização do teste e respectivos tempos de exposição solar.

Data	Horário inicial (horas)	Horário final (horas)	Tempo de exposição (horas)
10/04/2024	9:00	15:00	6
23/04/2024	11:00	13:00	2
08/05/2024	10:00	14:00	4

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Para cada um dos testes, a iluminância foi registrada com um luxímetro. A quantidade de dados registrados, a média e o desvio padrão correspondente a cada teste estão apresentados abaixo na Tabela 4.

Tabela 4 – Iluminância média e desvio padrão dos valores medidos.

Data	Tempo de exposição	Quantidade de medidas	Iluminância (lx)	
			Média	Desvio Padrão
23/04/2024	2	8	32361,3	13266,3
08/05/2024	4	16	45193,1	4775,3
10/04/2024	6	24	53657,5	18381,2

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

As médias de iluminância calculadas demonstraram haver diferenciação entre os testes, bem como um alto desvio padrão para valores medidos em um mesmo dia. Destaca-se que os valores adquiridos no teste de 4 horas de exposição apresentaram a menor variação ao longo do experimento.

Da mesma forma que os valores de iluminância, foram calculados a média e o desvio padrão para a radiação registrada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos momentos de execução de cada teste. Os valores estão dispostos abaixo na Tabela 5.

Tabela 5 – Radiação média e desvio padrão dos dados do INMET.

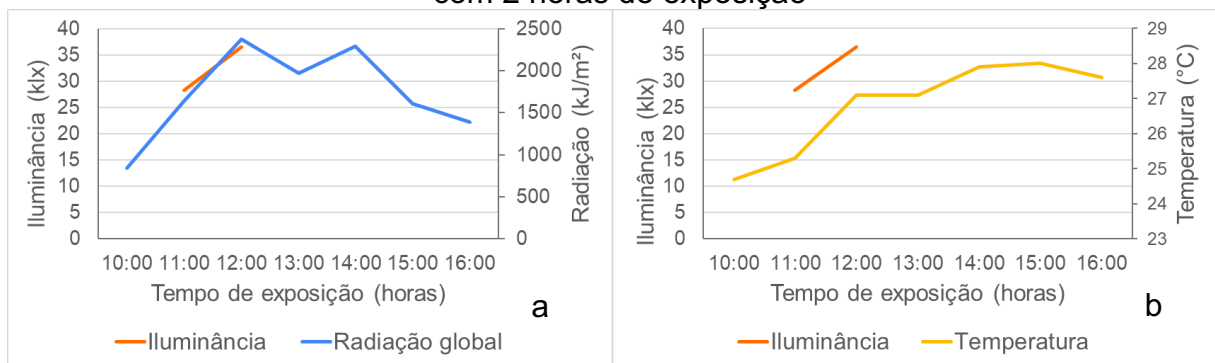
Data	Tempo de exposição	Quantidade de medidas	Radiação (kJ/m ²)	
			Média	Desvio Padrão
23/04/2024	2	2	2007,05	518,9
08/05/2024	4	4	2094,98	107,7
10/04/2024	6	6	2246,22	433,7

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Quanto aos valores referentes à radiação, ressalta-se que as médias dos valores dos três testes se mostraram próximas entre si, apresentando a mesma ordem de magnitude e, portanto, demonstrando uniformidade na energia recebida pelo reator.

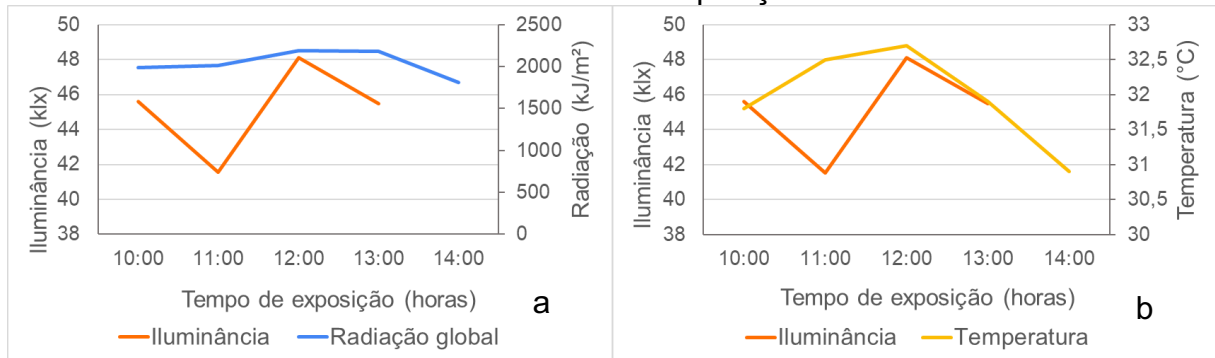
Os dados coletados por meio da utilização do luxímetro foram dispostos graficamente com intuito de verificar a existência de uma relação com os dados de radiação (kJ/m²) e temperatura (°C) registrados pela estação meteorológica do INMET. Assim, obteve-se os gráficos da Figura 10, Figura 11 e Figura 12.

Figura 10 – Comparação da iluminância com (a) radiação e (b) temperatura do teste com 2 horas de exposição



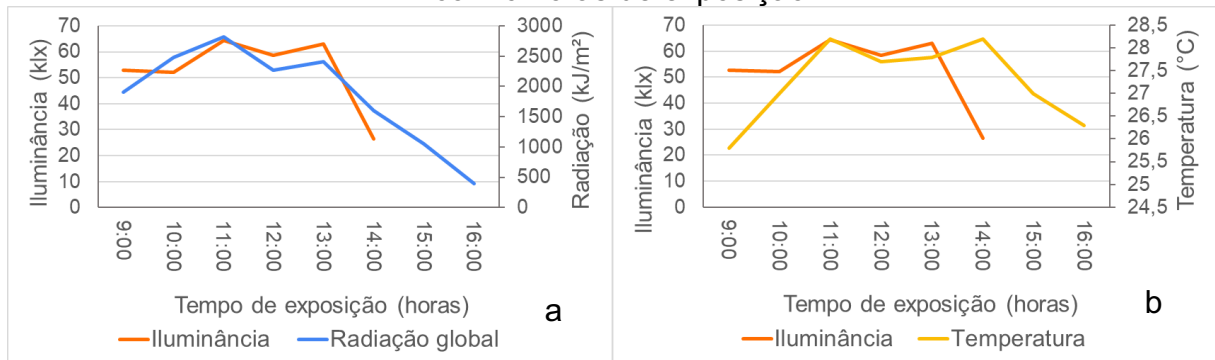
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 11 – Comparação da iluminância com (a) radiação e (b) temperatura do teste com 4 horas de exposição



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 12 – Comparação da iluminância com (a) radiação e (b) temperatura do teste com 6 horas de exposição



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Além da disposição gráfica dos dados foi realizado cálculo de correlação entre os valores visando averiguar a existência de vínculo entre elas. Os valores desse cálculo estão apresentados abaixo na Tabela 6.

Tabela 6 – Correlação da iluminância com a radiação e a temperatura

	Data	Correlação	
		Radiação	Temperatura
Iluminância	10/04/2024	0,83	-0,09
	23/04/2024	1,00	1,00
	08/05/2024	0,63	0,03

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Sendo que valores próximos de -1 e 1 indicam correlação forte e valores próximos a zero indicam correlação baixa.

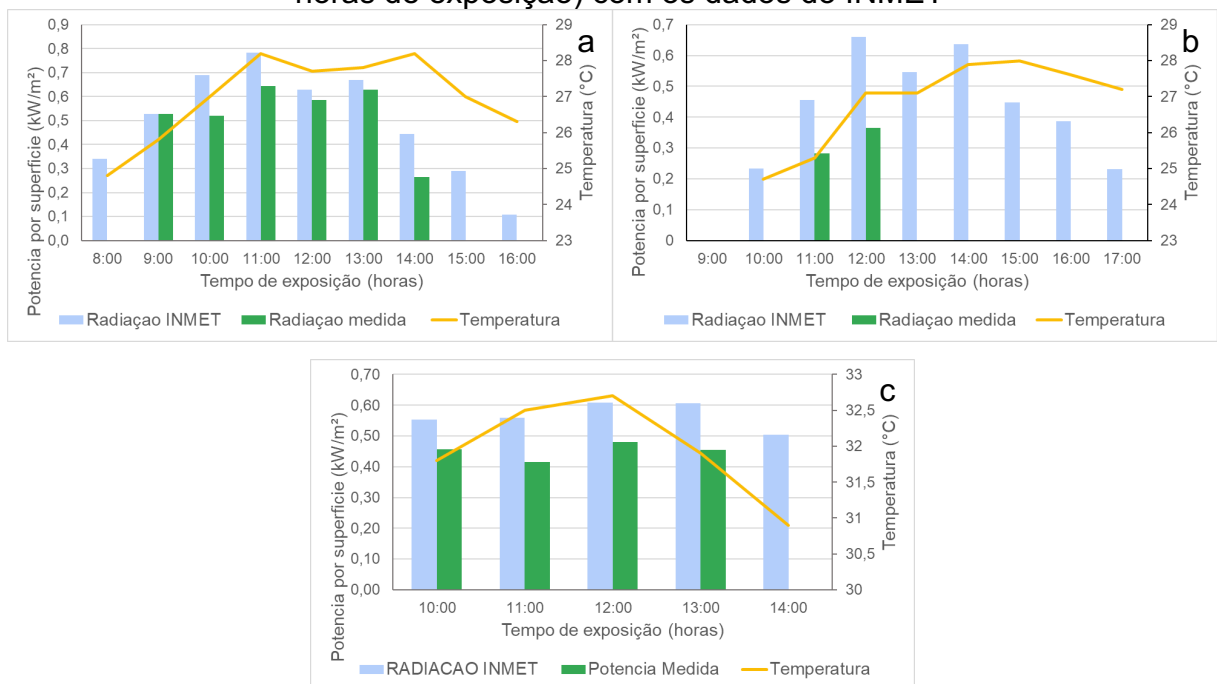
Como evidenciado nas Figuras 10, 11 e 12 e na Tabela 6, essas três variáveis, de modo geral, apresentaram comportamentos semelhantes e estão

matematicamente correlacionadas. Isso sugere que, embora não tenham sido realizadas medições diretas de radiação e/ou temperatura no local específico dos testes, os valores de iluminância registrados representam de forma satisfatória o comportamento dos dois parâmetros.

O único momento em que esse comportamento similar não foi observado foi no dia 8 de maio, às 11 horas, quando o valor de iluminância apresentou uma ligeira queda, enquanto os valores de radiação e temperatura se mantiveram estáveis. Essa discrepância pode ser atribuída à distância entre o ponto de estudo e a estação meteorológica, localizada na região metropolitana de Florianópolis/SC. No entanto, ao realizar o teste de correlação, esse mesmo dia, apesar da discrepância mencionada, apresentou correlações mais próximas de zero, indicando maior correlação entre as variáveis.

Uma vez que a correlação foi demonstrada, calculou-se a potência por unidade de área a partir dos dados de radiação do INMET e fez-se o mesmo com os valores de iluminância coletados. Posteriormente, os valores obtidos foram dispostos, juntamente com os dados de temperatura, nos gráficos da Figura 13, apresentada abaixo.

Figura 13– Comparação das radiações calculadas dos ensaios do dia (a) 10/04/2024 (6 horas de exposição) (b) 23/04/2024 (2 horas de exposição) e (c) 08/05/2024 (4 horas de exposição) com os dados do INMET



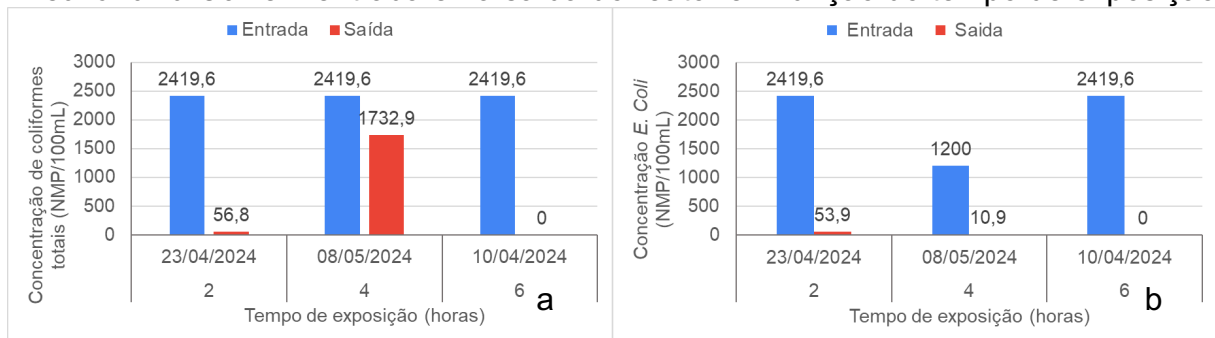
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A análise dos resultados apresentados nos gráficos da Figura 14 revela que a diferença entre a radiação coletada pelo INMET e a calculada a partir dos dados coletados pelo luxímetro, utilizando a aproximação da eficiência solar, possui a mesma ordem de magnitude.

4.2 DESINFECÇÃO

Quanto ao processo de desinfecção do efluente e a conseqüente remoção de coliformes totais e *E. coli*, os valores de ambos os microrganismos em NMP/100 mL antes e após a exposição solar para três tempos de exposição estão apresentados abaixo na Figura 19.

Figura 14– Comparação da concentração de (a) Coliformes totais e de (b) *Escherichia Coli* em entrada e na saída do reator em função do tempo de exposição



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

De acordo com os valores apresentados na Figura 19, é possível observar que os valores de NMP/100 mL foram elevados para ambos os microrganismos em todos os dias de teste. Da mesma forma, é possível notar diminuição na concentração desses mesmos microrganismos em todos os casos, evidenciando a eficácia da radiação solar UV na inativação das bactérias.

Inicialmente, nos resultados derivados das duas horas de exposição é possível observar que tanto a concentração de coliformes totais quanto *Escherichia coli* tiveram reduções de 98% em relação as concentrações de entrada, indicando elevada eficiência do processo.

Ubomba-Jaswa et al. (2009) alcançaram resultados satisfatórios ao realizarem a desinfecção estática de efluentes, com a concentração de microrganismos atingindo níveis abaixo do limite de detecção após duas horas de exposição solar. Em termos

de tempo de exposição ao sol, os resultados de Aboushi et al. (2022) corroboram com esses achados, apresentando uma diminuição acentuada na concentração de coliformes totais e *E. coli* em apenas duas horas de exposição, similarmente aos resultados de Ubomba-Jaswa. Esses estudos evidenciam a eficácia da radiação solar UV na rápida desinfecção de efluentes.

No teste referente a quatro horas de exposição, a concentração de coliformes totais na saída mostrou-se mais elevada do que no teste de duas horas, indicando uma remoção de 28%. Em contrapartida, o mesmo tempo de exposição resultou em uma concentração de *E. coli* na saída de apenas 10,9 NMP/100 mL, indicando uma remoção de 99% do patógeno. Dessa forma, é possível que tenham ocorrido interferências no processo de desinfecção, como a elevada concentração de partículas sólidas em suspensão e/ou dissolvidas, que, conforme mencionado no item “2.2.1.4 Qualidade do efluente” deste documento, podem interferir no processo.

Cowie et al. (2020), ao utilizarem o método SODIS para a desinfecção de águas residuais domésticas, demonstraram que é possível produzir água potável. O tempo mínimo necessário, conforme indicado em seu estudo, é de seis horas de exposição.

Esses resultados estão de acordo com os obtidos no presente estudo, pois, conforme a Figura 14, após seis horas de exposição, o efluente que inicialmente possuía concentrações máximas detectáveis pelo método Colilert não apresentou valores detectáveis após o processo de desinfecção para nenhum dos dois microrganismos testados

Além desse estudo, muitos estudos sobre o método SODIS mostram grande eficácia, mas, acima de tudo, muitos deles estabelecem um limite de seis horas de exposição (MCGUIGAN; JOYCE; CONROY, 1999; CHAÚQUE; ROTT, 2021; (GARCÍA-GIL et al., 2021)).

Ao final, foi verificada a eficiência da radiação solar ultravioleta na desinfecção de efluente tratado em wetland construído vertical de fundo saturado.

Finalmente, observando a quantidade de energia necessária para diminuir a concentração de *E. coli* em água de laboratório (ou seja, com menos turbidez do que o esgoto) em 4 logs, conforme determinado em 2012 por Malley, ou seja, 20 mWsec/cm², entende-se a eficácia deste método de desinfecção.

4.3 ENQUADRAMENTO DA ÁGUA DE REUSO

Após a eficiência do método ser observada, fez-se uma comparação com os valores microbiológicos obtidos com os padrões de documentos e normativas brasileiras que mencionam o reuso e possuem padrões referentes a estes microrganismos testados. As informações estão dispostas abaixo na Tabela 7, onde os valores em vermelho destacam as concentrações finais que não atendem ao limite exigido pelo documento para o uso especificado.

Tabela 7 – Comparação das concentrações de Coliformes Totais e *E.coli* com os limites estabelecidos pelas normas empregadas no Brasil

Documento	Uso	Limites microbiológico (NMP/100 mL)		Concentrações finais nos tempos de exposição (NMP/100mL)		
		Totais	<i>E. coli</i>	2h	4h	6h
Programa Inter águas	Agrícola irrestrito	<10	-	56,8	1732,9	ND
	Agrícola restrito	<10 ³	-	56,8	732,9	ND
	Urbano irrestrito	<10	-	56,8	1732,9	ND
	Urbano restrito	<10 ³	-	56,8	1732,9	ND
NBR 16783	Diverso	-	≤200	53,9	10,9	ND
PROSAB	Agrícola irrestrito	≤ 10 ³	-	56,8	1732,9	ND
	Agrícola restrito	≤ 10 ⁴	-	56,8	1732,9	ND
	Urbano irrestrito	≤ 200	-	56,8	1732,9	ND
	Urbano restrito	≤ 10 ⁴	-	56,8	1732,9	ND
	Uso predial	≤10 ³	-	56,8	1732,9	ND

Legenda: ND: Não detectável; NMP: Número mais provável.

*Destaca-se apenas 1 normativa dentre as consideradas no estudo que apresentam resultados em termos de *E.coli*

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

De acordo com a Tabela 7, nota-se que as concentrações finais de coliformes totais após quatro horas de exposição à radiação solar UV atenderam apenas aos critérios do PROSAB para os usos “Agrícola Restrito” e “Urbano Restrito”.

Em relação às concentrações de coliformes totais, o efluente exposto por apenas duas horas atendeu a sete dos nove limites estabelecidos, não sendo apto para os usos “Agrícola Irrestrito” e “Urbano Irrestrito” definidos pelo Programa Interáguas.

As concentrações de coliformes totais obtidas no teste de seis horas de exposição à radiação solar não apresentaram valores detectáveis pelo método Colilert, adequando-se a todos os limites e, conseqüentemente, aos usos especificados nos documentos analisados.

Quanto à NBR 16.783, que estabelece limites de *Escherichia coli* para o reuso “Diverso”, todos os tempos de exposição resultaram em concentrações de microrganismos no efluente abaixo do limite, sendo as águas tratadas, portanto, aptas para reuso de acordo com essa normativa.

4.3 CONCLUSÃO

Ao final do estudo, a utilização de radiação solar ultravioleta demonstrou ser eficaz na remoção de coliformes totais e *Escherichia coli*, alcançando percentuais de 97% para ambos os microrganismos após apenas duas horas de exposição do efluente à radiação. Com seis horas de exposição, as remoções atingiram 100%, não sendo detectável qualquer concentração desses microrganismos utilizando a metodologia Colilert.

Ao confrontar os resultados dos testes com documentos e normativas que estabelecem padrões microbiológicos para o reuso do efluente, verificou-se que os efluentes submetidos a 2 horas, 4 horas e 6 horas de exposição foram enquadrados em algum uso regulamentado. Vale ressaltar que nenhuma dessas regulamentações leva em consideração outros microrganismos, como determinados tipos de vírus, que poderiam ser mais adaptados para servirem de indicadores neste caso.

Assim, ao adotar abordagens práticas e comparativas, este estudo demonstrou que é possível obter água de reuso utilizando um reator que emprega radiação solar ultravioleta para a desinfecção de efluentes domésticos tratados em um sistema de wetland construído vertical de fundo saturado.

Contudo, destaca-se a importância da realização de novos testes para assegurar a qualidade e segurança microbiológica da água de reuso. Estes testes adicionais são essenciais para validar os resultados apresentados neste estudo e abrir novas possibilidades de aplicação e desenvolvimento na área de tratamento de efluentes e geração de água de reuso.

REFERÊNCIAS

- ABOUSHI, A. et al. Water disinfection by solar energy. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 43, n. 17, p. 2088–2098, 2 set. 2021
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16783**: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BLANCO, J.; MALATO, S. **Solar Energy Conversion And Photoenergy System - Volume I**. [s.l.] EOLSS Publications, 2009.
- BLEVIN, W. R; STEINER, B. Redefinition of the Candela and the Lumen. **Metrologia**, v.11, n.3, p. 97, jul. 1975.
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007: Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2007/lei/L11445compilado.htm. Acesso em: 02 fev. 2021.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020: Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20192022/2020/Lei/L14026.htm#art11. Acesso em: 04 fev. 2021.
- CAPODAGLIO, A. G. et al. Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. **Water Practice and Technology**, v. 12, n. 2, p. 463–477, 1 jun. 2017.
- CHANG, S. L. Modern Concept of Disinfection. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 97, n. 5, p. 689–707, 1 out. 1971.
- CHAÚQUE, B. J. M.; ROTT, M. B. Solar disinfection (SODIS) technologies as alternative for large-scale public drinking water supply: Advances and challenges. *Chemosphere*, v. 281, p. 130754, 1 out. 2021.
- CONAMA, C. N. D. M. A. Resolução CONAMA no357. , 17 mar. 2005.
- DA SILVA CELESTINO m, V. Potencial solar na ilha de Florianópolis - proposta de método. 2020.
- DARBY, J. L.; SNIDER, K. E.; TCHOBANOGLOUS, G. Ultraviolet Disinfection for Wastewater Reclamation and Reuse Subject to Restrictive Standards. **Water Environment Research**, v. 65, n. 2, p. 169–180, 1993.
- DOTRO, G. et al. **Treatment Wetlands**. [s.l.] IWA Publishing, 2017.
- DOUKI, T. et al. Effets néfastes du rayonnement UVA solaire : de nouveaux indices dans l'ADN. **médecine/sciences**, v. 23, n. 2, p. 124–126, 1 fev. 2007.
- DYMACZEWSKI, Z. et al. Redefining the purpose, goals and methods of disinfection in contemporary water supply systems. **Archives of Environmental Protection**, v. 46, p. 85–92, 15 jan.

2020.

MARTINS, R. J. **A radiação ultravioleta na desinfecção de águas residuais domésticas.**

1. ed. [s.l.] Quipá Editora, 2021.

FINLAYSON, C. M.; VAN DER VALK, A. G. Wetland classification and inventory: A summary.

Vegetatio

GARCÍA-GIL, Á. et al. Solar Water Disinfection to Produce Safe Drinking Water: A Review of Parameters, Enhancements, and Modelling Approaches to Make SODIS Faster and Safer. **Molecules**, v. 26, n. 11, p. 3431, jan. 2021.

KNOWLES, P. et al. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 2, p. 99–112, 1 fev. 2011.

LAURENT, J.; BOIS, P.; BECK, C. Traitement des eaux usées - Niveau 1. , 2020.

MALLEY, J. P. **Ultraviolet Disinfection**, 2012. (Nota técnica).

MARNOTTE, P.; CARRARA, A. **Plantes des rizières de Camargue.** [s.l.] Editions Quae, 2006.

MCGUIGAN, K.; JOYCE, T.; CONROY, R. Solar disinfection: Use of sunlight to decontaminate drinking water in developing countries. *Journal of medical microbiology*, v. 48, p. 785–7, 1 out. 1999.

MCGUIGAN, K. G. et al. Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. **Journal of Hazardous Materials**, v. 235–236, p. 29–46, 15 out. 2012.

MOTTIM JUSTINO, N. **Processo foto-fenton solar mediador por ferrioxalato (FeOx/H₂O₂/UV) aplicado ao tratamento de efluente têxtil.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

MUFARREGE, M. M. et al. Adaptability of *Typha domingensis* to high pH and salinity. **Ecotoxicology**, v. 20, n. 2, p. 457–465, 1 mar. 2011.

NOZAIC, D. J. Chlorine: Is it really so bad and what are the alternatives? *Water SA*, v. 30, n. 5, p. 18–24, 2004.

OXFORD UNIVERSITY PRESS. **Dicionário de Português licenciado**, [s.d.].

PEYCRU, P. et al. **Biologie tout-en-un BCPST 1re année.** [s.l.] Dunod, 2019.

PICHEL, N.; VIVAR, M.; FUENTES, M. The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. **Chemosphere**, v. 218, p. 1014–1030, 1 mar. 2019.

REJMANKOVA, E. The role of macrophytes in wetland ecosystems. **Journal of Ecology and Environment**, v. 34, n. 4, p. 333–345, 2011.

ROSER, M.; ORTIZ-OSPINA, E. World Population Growth. 2017.

SCHEIBLE, O. K. Development of a Rationally Based Design Protocol for the Ultraviolet Light Disinfection Process. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, v. 59, n. 1, p. 25–31, 1987.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO. **Informações para planejar o Saneamento Básico.** , 2021.

SEZERINO, P. et al. **Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário.** [s.l: s.n.].

SEZERINO, P.; PELISSARI, C. **Wetlands construídos como ecotecnologia para**

tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras. Primera edição ed. [s.l: s.n.].

UBOMBA-JASWA, E. et al. Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of the effect of UV-A dose on inactivation efficiency. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 8, n. 5, p. 587–595, 1 maio 2009.

UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. **World Population Prospects 2022: Summary of Results.** 2022. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf>

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Convenção sobre Zonas Húmidas de Importância Internacional, especialmente como Habitat de Aves Aquáticas.** Ramsar: 1971.

VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 61–69, 1 jan. 2011.

YAMAMOTO, J. et al. A cyclobutane thymine–N-methylcytosine dimer is resistant to hydrolysis but strongly blocks DNA synthesis. **Nucleic acids research**, v. 42, 31 out. 2013.

APÊNDICE A – Resumo do TCC em francês (ENGEES)

Les contextes démographique et énergétique actuels, ainsi que les saisons de plus en plus marquées par des événements extrêmes, imposent la nécessité de systèmes qui tirent le meilleur parti de l'eau. L'objectif de cette étude a été d'analyser la faisabilité de la production d'eau réutilisable (selon les normes brésiliennes) par des traitements basés sur la nature à partir d'eaux usées domestiques (eaux noires et grises).

Le traitement en amont de la désinfection par exposition aux radiations solaires est composé d'une fosse septique et d'un système de wetlands construits à flux vertical à fond saturé. De son côté, la désinfection s'est réalisée dans un réacteur parabolique composé concentrateur où le fluide était au repos, c'est-à-dire qu'il n'y avait pas de circulation au sein du réacteur. L'effluent du système de traitements était alors désinfecté par le rayonnement solaire ultraviolet. Pour cette étude, l'exposition aux radiations solaires s'est réalisée autour de midi pour capter l'intensité la plus forte, et l'effluent a été exposé à différents temps d'exposition.

Pour connaître l'efficacité du traitement, une comparaison entre la concentration en entrée et en sortie de coliformes totaux et d'*Escherichia Coli* ont été réalisés. Ces concentrations ont été déterminées avec des tests Colilert.

Les résultats de cette étude montrent que cette méthode est efficace pour produire une eau réutilisable selon les normes brésiliennes. Cependant, pour il faudrait faire plus d'études pour connaître toutes les variables qui jouent lors de ce processus, pour ainsi augmenter en efficacité.

