



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil

Curso de Graduação em Engenharia Civil



Melissa de Almeida Goulart

**ENSAIOS DE UM PROTÓTIPO DE DESINFECÇÃO COM
LED UV (DIODOS EMISSORES DE LUZ) APLICADO A
EFLUENTE DE SISTEMA DE VERMIFILTRAÇÃO**

Ouro Preto
2023

Melissa de Almeida Goulart

Ensaio de um protótipo de desinfecção com LED UV (Diodos Emissores de Luz) aplicado a efluente de sistema de vermifiltração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago

Co-orientadora: Dra. Grazielle Rocha dos Santos

Ouro Preto
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G694e Goulart, Melissa de Almeida.
Ensaio de um protótipo de desinfecção com LED UV(diodos emissores de luz) aplicado a efluente de sistema de vermifiltração. [manuscrito] / Melissa de Almeida Goulart. - 2023.
53 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago.
Coorientadora: Dra. Grazielle Rocha dos Santos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Águas residuais - Aspectos ambientais - Vermifiltro. 2. Saneamento - Ecologia. 3. Desinfecção e desinfetantes. 4. (Light Emitting Diodo Ultravioleta) LED UV. I. Santiago, Aníbal da Fonseca. II. Santos, Grazielle Rocha dos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Melissa de Almeida Goulart

Ensaio de um protótipo de desinfecção com LED UV (Diodos Emissores de Luz) aplicado a efluente de sistema de vermifiltração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Aprovada em 10 de agosto de 2023.

Membros da banca

Aníbal da Fonseca Santiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Grazielle Rocha dos Santos - Co-orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Ana Letícia Pilz de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto
Múcio André dos Santos Alves Mende - Universidade Federal de Ouro Preto

Aníbal da Fonseca Santiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/10/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Anibal da Fonseca Santiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/10/2023, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0611005** e o código CRC **95755E9C**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, Energia Onipotente, Onipresente e Onisciente. Porque Deus é, Damos graças e louvores!

Aonde cheguei nada se moveu sem a Mão Divina permitir e abrir caminhos externos e internos.

Grandiosa é Nossa Senhora, Mãe Maior e todos os Seres Celestiais que me acompanham e me auxiliam em cada jornada.

Agradeço aqueles que me concederam a vida e aqueles que abriram caminho nessa existência, meus ancestrais que são raiz forte para que eu possa florescer na árvore da vida. Reconheço toda sabedoria que me é concedida e me alegro.

Aqueles que me cercam e me é permitido ter ricas trocas e vivenciar momentos preciosos tem um significado especial e tem grande parte nessa conquista e na construção do meu ser. São como Ouro que faz brilhar meu coração.

Agradeço também a todos os Mestres que com sua dedicação me trouxeram grandes aprendizados, aqueles que compartilhei momentos de empatia e crescimento.

Chegar ao final desse ciclo representa para mim uma grande lição de Persistência e Fé, vencer as próprias limitações e alcançar lugares que antes duvidei.

Agradeço imensamente ao Professor Dr. Aníbal, meu Orientador, que se dispôs a me auxiliar com sua sabedoria, paciência e entusiasmo, sendo essencial na realização desse trabalho.

Agradeço à minha Co Orientadora, Dr. Grazielle Rocha, que com toda amorosidade e conhecimentos compartilhados foi de grande importância. À UFOP, ao Laboratório de Saneamento Ambiental e todos os integrantes que sempre se dispuseram a contribuir com alegria na concretização dessa pesquisa.

Agradeço à Laura e sua família por terem permitido que seu lar fosse o ponto de partida do estudo e abriram suas portas com muito carinho.

Agradeço a todos da minha família e grandes amigos, pelo suporte diário e por serem fonte de amor, força, fé e realização.

Portas internas que se abrem verdadeiramente não se fecham, são atravessadas.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original.”

Onde chega a luz a escuridão vai embora.

“A luz resplandece na terra e as trevas não prevaleceram contra ela.” João 1:5

A água, grande maravilha que nos compõe e envolve, nosso bem maior, nossa Avó dessa existência, Fonte da Vida, precisa ser preservada e me satisfazer saber que meus esforços tiveram como inspiração buscar contribuir nesta missão, de cuidar, conscientizar e reparar os danos já causados pela nossa espécie.

RESUMO

O vermifiltro é uma tecnologia social empregada no saneamento ecológico descentralizado, com finalidade de realizar o tratamento de águas fecais em propriedades, gerando um efluente mais adequado a ser dispensado no meio ambiente. O presente estudo foi realizado com objetivo de melhorar o desempenho do sistema de vermifiltração e de outros sistemas de saneamento descentralizado, buscando a desinfecção (tratamento terciário) desse efluente. Para isso foi desenvolvido um protótipo de desinfecção com lâmpada de luz LED UV, em vista do benefício que essa lâmpada oferece, por ser barata, resistente e consumir pouca eletricidade. Foi utilizada uma lâmpada de comprimento de onda definido de 254nm no protótipo e foram realizados testes com amostras coletadas do efluente tratado de um vermifiltro situado em Ouro Preto. Para ocorrer a desinfecção almejada, o efluente necessita ser submetido à uma dosagem definida de radiação. Essa dose está diretamente ligada à intensidade da lâmpada utilizada e ao tempo de detenção hidráulica que o efluente é exposto. Para definir tais parâmetros recorreu-se à estudos literários e ensaios de identificação da intensidade de radiação recebida pelo efluente de acordo com a distância entre a lâmpada e a lâmina d'água dentro do reator. A partir das amostras coletadas ao final do tratamento foram realizados ensaios para definir os resultados da proposição em questão. Foi realizada a caracterização microbiológica, que determina a eficiência de remoção e a unidade log removida a 254nm dos patógenos da ordem *Escherichia coli*. Foram definidos parâmetros físicos e químicos convencionais, como pH, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Turbidez e Absorbância. Tais parâmetros foram comparados a dados existentes de pesquisas envolvendo outros modelos de saneamento e à normatização definida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente para efluentes de esgotamento sanitário. O vermifiltro apresentou resultados próximos daqueles identificados em literatura e seu efluente atingiu qualidade satisfatória em relação ao nível de pH e DBO. Porém, por apresentar nível elevado de turbidez e absorbância a desinfecção esperada pelo protótipo não foi alcançada, já que águas com turbidez elevadas apresentam baixa inativação e devido a elevada absorbância os raios UV podem ter sido impedidos de alcançar os microorganismos, o que afetou negativamente a inibição dos patógenos.

Palavras Chave: Vermifiltro, Saneamento ecológico, LED UV, Desinfecção.

ABSTRACT

The vermifilter is a social technology employed in decentralized ecological sanitation systems with the purpose of treating wastewater on-site, generating an effluent more suitable for disposal in the environment. The present study aimed to improve the performance of the vermifiltration system and other decentralized sanitation systems by seeking the disinfection (tertiary treatment) of this effluent. For this purpose, a prototype disinfection system with UV LED light was developed, considering the benefits offered by this lamp, such as its low cost, durability, and low electricity consumption. A lamp with a specific wavelength of 254nm was used in the prototype, and tests were conducted using samples collected from the treated effluent of a vermifilter located in Ouro Preto. In order to achieve the desired disinfection, the effluent needs to be exposed to a defined dosage of radiation. This dosage is directly related to the intensity of the lamp used and the detention time that the effluent is exposed to. To define these parameters, recourse was made to literature studies and tests to determine the intensity received by the effluent based on the distance between the lamp and the water level inside the reactor. Based on the samples collected at the end of the treatment, tests were conducted to determine the results of the proposed approach. Microbiological characterization was performed to assess the removal efficiency and log reduction of pathogens, specifically *Echerichia coli*, at 254nm. Conventional physical and chemical parameters were defined, including pH, Biochemical Oxygen Demand (BOD), Turbidity, and Absorbance. These parameters were compared to existing data from research involving other sanitation models and the standards defined by the National Council for the Environment for sewage effluents. The vermifilter showed results close to those identified in the literature, and its effluent achieved satisfactory quality in terms of pH and BOD levels. However, due to its high turbidity and absorbance levels, the expected disinfection by the prototype was not achieved. Elevated turbidity in water leads to low inactivation, and the high absorbance may have prevented UV rays from reaching the microorganisms, negatively affecting the inhibition of pathogens.

Keywords: Vermifilter, Ecological sanitation, UV LED, Disinfection

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Esquema do Sistema Tohá. | 18 |
| Figura 2 - Vermifiltro esquematizado..... | 19 |
| Figura 3 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa. | 26 |
| Figura 4 - Parte externa do vermifiltro instalado (a) e esquema interno (b)..... | 27 |
| Figura 5 - Vista superior da parte interna do vermifiltro..... | 28 |
| Figura 6 - Medição da intensidade com radiômetro no protótipo 1..... | 31 |
| Figura 7 - Posicionamento dos pontos na área definida para protótipo 2..... | 31 |
| Figura 8 - Protótipo 1 desenvolvido (a) e esquema do protótipo 1 (b)..... | 33 |
| Figura 9 - Esquema do protótipo 2. | 34 |
| Figura 10 - Vista superior do protótipo 2 adaptado com bomba submersa. | 35 |
| Figura 11 - Vista lateral do protótipo 2 com a lâmpada em funcionamento. | 35 |
| Figura 12 - Protótipo 2 em funcionamento durante a execução do ensaio. | 35 |
| Figura 13 - Amostras coletadas do efluente após tratamento no protótipo 2. | 36 |
| Figura 14 - Tabela de resultados de inativação de E.coli utilizando radiação ultravioleta | |

Error! Bookmark not defined.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Principais microrganismos patogênicos existentes nos esgotos sanitários..... | 23 |
| Tabela 2 - Experimentos realizados por vários pesquisadores. | 24 |
| Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização para protótipo 1 e protótipo 2..... | 37 |
| Tabela 4 - Intensidade de radiação de acordo com a distância entra a lâmpada e o radiômetro. | 38 |
| Tabela 5 - Intensidades em cada ponto definido..... | 39 |
| Tabela 6 - Intensidades em cada ponto definido..... | 40 |
| Tabela 7 - Caracterização Microbiológica das 5 amostras. | 41 |
| Tabela 8 – Eficiência de remoção das amostras 1 e 2..... | 41 |

LISTA DE SIGLAS

CERH/MG - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL

CT - coliformes totais

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

E. Coli - Escherichia coli

LED UV: Diodos Emissores de Luz UltraVioleta

LMBT - Laboratório de Microbiologia e Bioprospecção Tecnológica

NMP - número mais provável

nm – Nanômetro OD - Oxigênio Dissolvido

ORP - Potencial de oxi-redução

OMS - Organização Mundial da Saúde

pH: Potencial Hidrogeniônico

Plansab - Plano Nacional de Saneamento Básico

UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto

UNICAMP- Universidade Estadual de Campinas

UT- Unidade de Turbidez

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 OBJETIVO | 13 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 13 |
| 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO | 13 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 3.1 NECESSIDADE DO SANEAMENTO | 14 |
| 3.2 SANEAMENTO BÁSICO COMO DIREITO HUMANO | 15 |
| 3.3 SANEAMENTO BÁSICO COMO PROMOÇÃO DA SAÚDE..... | 15 |
| 3.4 EIXOS ESTRATÉGICOS: SOLUÇÕES PARA O SANEAMENTO RURAL 15 | |
| 3.4.1 Eixo gestão..... | 16 |
| 3.4.2 Eixo educação e participação social | 17 |
| 3.4.3 Eixo tecnologia | 17 |
| 3.5 VERMIFILTRO..... | 17 |
| 3.6 FORMAS DE DESINFECÇÃO DE EFLUENTE..... | 20 |
| 3.7 DESINFECÇÃO ATRAVÉS DA RADIAÇÃO UV..... | 201 |
| 3.8 DOSE DE RADIAÇÃO UV | 22 |
| 3.9 INATIVAÇÃO DE MICROORGANISMOS PATOGÊNICOS UTILIZANDO LÂMPADAS LED UV | 23 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 26 |
| 4.1 PRIMEIRA FASE..... | 26 |
| 4.2 SEGUNDA FASE..... | 27 |
| 4.2.1 Primeira Etapa | 27 |
| 4.2.2 Segunda Etapa..... | 29 |
| 4.2.3 Terceira Etapa..... | 32 |
| 4.3 TERCEIRAFASE | 36 |
| 5 RESULTADOS..... | 37 |

| | |
|--|----|
| 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DO VERMIFILTRO UTILIZADO NO PROTÓTIPO 1 E PROTÓTIPO 2. (PRIMEIRA FASE)..... | 37 |
| 5.2 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO EMITIDA PELA LÂMPADA EM DISTÂNCIAS DISTINTAS. (SEGUNDA FASE)..... | 37 |
| 5.3 INTENSIDADE..... | 38 |
| 5.4 MICROBIOLÓGICO | 40 |
| 5.5 EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO..... | 41 |
| 6 DISCUSSÃO | 42 |
| 7 CONCLUSÃO | 46 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde – OMS, em 2015 o mundo apresentava um grande déficit no acesso ao saneamento básico, cerca de 2.4 bilhões de pessoas no planeta, ou uma em cada três, desprovidas dos serviços. Relativo aos esgotos, cerca de 1 bilhão de pessoas (14% da população mundial) não possuíam nenhuma forma de instalação sanitária. No Brasil, cerca de 23 milhões de pessoas na zona rural sem coleta ou tratamento de esgoto, o que corresponde a 75% da população rural (RESENDE; FERREIRA; FERNANDES, 2018). A precariedade dos serviços de saneamento gera problemas ambientais e diversos riscos à saúde humana.

Como forma de atender à demanda da questão sanitária no Brasil, foi aprovada a Lei nº 14.026/2020, conhecida como o novo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil, que trouxe alterações significativas para o setor e busca ampliar o acesso aos serviços de saneamento básico em áreas rurais, estabelecendo diretrizes para a implantação de sistemas adequados de abastecimento de água e de tratamento de esgoto nessas regiões.

Um dos objetivos traçados pela legislação anterior e que segue sendo aprimorado, é de proporcionar condições adequadas de salubridade ambiental às populações rurais e de pequenos núcleos urbanos isolados (BRASIL, 2013). Assim, em locais que possuem baixa densidade populacional, as redes de coleta de esgoto não existem ou não são suficientes para toda a área, existe a necessidade de adoção de soluções diferenciadas para a instalação e operação de sistemas de saneamento básico (TONETTI et al., 2018)

Neste caminho, além de novas formas de gestão, sendo a maioria baseada na participação comunitária, tem-se estudado diversas tecnologias sociais que possam proporcionar o acesso à água potável e ao tratamento de esgoto a estas populações, considerando principalmente a adaptação à realidade socioeconômica, cultural e ambiental do local (FUNASA, 2011). As tecnologias sociais apresentam como características a efetividade e a replicação, além de agrupar o saber popular, organização social e conhecimento técnico-científico (MARQUES, 2010). Mas apesar de seu potencial, elas apresentam limitações e desafios relacionados à sua disseminação. Ao implementar uma tecnologia social como política pública, é importante considerar as especificidades e a participação ativa das comunidades, para evitar uma padronização que pode gerar perda na sua essência (COSTA, 2013). Além de buscar melhorias a serem realizadas como baratear os custos de implantação e desenvolver melhorias de desempenho.

De acordo com tal conceito, as famílias podem recorrer às alternativas que lhes são

mais acessíveis de acordo com sua condição, como, fossa séptica, círculo de bananeiras, tanque de evapotranspiração e vermifiltro, que é bem menos difundido dentre as outras.

Considerando a necessidade de melhorias nas tecnologias sociais relacionadas ao saneamento básico, o estudo em questão tem como proposta analisar o sistema de vermifiltro, utilizado em alguns lugares, e avaliar melhorias para ele. Tendo em vista que dentre as alternativas, o sistema de vermifiltração é pouco disseminado e tem poucos estudos acerca de sua implementação.

O vermifiltro por ser uma tecnologia natural e ecologicamente correta, pode ser uma escolha acertada para o tratamento de esgoto doméstico. Para ser considerada apropriada, ela deve reunir certos critérios que passam por: Prevenir doenças, ser acessível, proteger o meio ambiente, ser aceito pela comunidade, simples e estar alinhado aos princípios do saneamento ecológico (ESREY et al., 1998). Entretanto, alguns estudos citam a necessidade do efluente ser submetido a um tratamento posterior, como por exemplo o círculo de bananeira, com finalidade de complementar o tratamento implementado. Como o tratamento em questão não possui seu desempenho amplamente conhecido quando se refere ao tratamento de patógenos, o presente estudo tem como objetivo analisar o desempenho da vermifiltração em relação à desinfecção patogênica e avaliar a eficácia de um tratamento complementar de desinfecção a ser acoplado em um vermifiltro.

Desta forma, o tratamento do efluente gerado pela vermifiltração pode ser melhorado com a introdução de uma etapa de inativador de microrganismos, principalmente de patogênicos. Para isso, optou-se por utilizar um agente físico de desinfecção, a tecnologia da luz LED UV, com diodos emissores de luz, que oferece eficiência na inibição de microrganismos patogênicos e por ser resistente e de baixo custo de instalação é capaz de atender tal demanda. Oferecendo menor impacto ambiental e baixo consumo energético, além de seguir no princípio de eficácia e acessibilidade no esgotamento descentralizado.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial da luz LED UV no tratamento complementar de desinfecção do efluente proveniente do tratamento denominado vermifiltro e identificar as limitações e potencialidades de sua aplicação.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- a) Identificar as principais características da produção científica relacionada à vermifiltração e a desinfecção germicida realizada pela luz LED UV.
- b) Analisar a qualidade do efluente gerado pelo vermifiltro.
- c) Desenvolver um protótipo de tratamento terciário que possa ser acoplado a sistemas de vermifiltração, com potencial de desinfecção do efluente lançado pelo sistema.
- d) Apontar as potencialidades e limitações da aplicação da luz LED UV como tratamento terciário relacionado à vermifiltração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 NECESSIDADE DO SANEAMENTO

A implementação de soluções de saneamento é crucial para a proteção da saúde humana, bem como para a manutenção da qualidade da água e do solo. O acesso às soluções é um direito social fundamental, integrante das políticas públicas sociais, como saúde, saneamento, habitação, segurança alimentar e nutricional, que devem ser garantidas pelo Estado. A saúde é o principal objetivo estratégico do saneamento, conforme estabelecido pela Constituição Federal em seu artigo 196. “ (...) é direito de todos e dever do Estado, garantido mediante políticas sociais e econômicas que visem à redução do risco de doença e de outros agravos e ao acesso universal e igualitário às ações e serviços para a promoção, proteção e recuperação”.

Para assegurar o alcance dos objetivos estratégicos do saneamento, estão as políticas públicas, que são abordagens multidimensionais que abrangem aspectos técnicos, socioeconômicos e culturais, com ênfase fundamental na saúde pública. Seu objetivo principal é alcançar níveis cada vez mais elevados de salubridade ambiental.

Nos últimos tempos, a correção do déficit histórico na oferta de serviços de saneamento para a população rural tem se tornado uma necessidade evidente para o país. Para abordar essa questão, foi criado o Plano Nacional de Saneamento Básico - Plansab (BRASIL, 2013), publicado em 2013, que previu a criação do Programa Nacional de Saneamento Rural.

O plano foi atualizado com a publicação da Lei 14.026, também conhecida como o Novo Marco Legal do Saneamento Básico, que foi promulgada no dia 15 de julho de 2020. Essa lei tem como objetivo estabelecer diretrizes para o setor de saneamento básico no Brasil, promovendo a universalização dos serviços de água e esgoto no país.

Embora a Lei 14.026/2020, o Novo Marco Legal do Saneamento Básico, tenha introduzido mudanças significativas no setor, o Plansab continua sendo uma diretriz fundamental e uma referência para o planejamento e execução de ações relacionadas ao saneamento básico no Brasil.

Uma das diretrizes fundamentais desse plano é assegurar meios adequados para atender às necessidades da população rural dispersa, levando em consideração suas características socioeconômicas. Isso implica na adoção de soluções compatíveis com as especificidades dessas áreas rurais.

Os programas delineados pelo Plansab para concretizar a Política Federal de

Saneamento Básico são: Saneamento Básico Integrado, Saneamento Estruturante e Saneamento Rural. O primeiro programa tem como objetivo financiar a implementação de medidas estruturais de saneamento básico em áreas urbanas, visando superar o déficit urbano no fornecimento de água potável, saneamento sanitário, limpeza urbana, gestão de resíduos sólidos, drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. O segundo programa concentra-se na implementação de medidas de apoio à gestão pública e à prestação de serviços, capacitação e assistência técnica, promoção do desenvolvimento tecnológico e científico, além de fortalecer a participação e controle social. O terceiro programa tem como objetivo universalizar o acesso ao saneamento básico em áreas rurais, por meio de ações que garantam equidade, integralidade, abordagem intersetorial, sustentabilidade dos serviços, além de incentivar a participação e controle social.

3.2 SANEAMENTO BÁSICO COMO DIREITO HUMANO

Embora a Organização das Nações Unidas (ONU) tenha estabelecido princípios do direito humano à água em documentos anteriores, foi somente em 2010 que a Assembleia Geral reconheceu explicitamente esse direito por meio da Resolução nº 64/292. Assim, o acesso à água potável para consumo humano e ao esgotamento sanitário, são condicionantes do pleno desfrute dos outros direitos (ONU, 2010). Tanto o direito à água quanto ao esgotamento sanitário deriva do direito a um nível de vida adequado e estão intrinsecamente relacionados a outros, como à vida, à dignidade humana e ao mais alto patamar de saúde física e mental (ONU, 2010).

Portanto, guiado por todos esses princípios, o direito humano à água abrange a garantia universal de acesso a água segura para uso pessoal e doméstico, em quantidade suficiente para suprir as necessidades humanas, de forma aceitável, física e economicamente acessível. Por outro lado, o direito humano ao saneamento refere-se à garantia de soluções que abranjam a coleta, o transporte, o tratamento do esgoto e a disposição adequada do lodo, garantindo a dignidade humana, a privacidade e um outro princípio normativo específico relacionado a esse componente do saneamento.

3.3 SANEAMENTO BÁSICO COMO PROMOÇÃO DA SAÚDE

A Lei Federal 14.026 de 2020 complementa o Plansab, fornecendo o arcabouço legal para o setor de saneamento básico, abrindo espaço para a participação do setor privado,

estabelecendo metas de universalização e definindo a regulação do setor. De acordo com as Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico, é ressaltada a importância do saneamento como uma ação de impacto coletivo, buscando garantir o atendimento essencial para a saúde pública e a proteção ambiental. Nesse contexto, o saneamento passa a ser reconhecido como uma iniciativa de promoção da saúde. Além de reduzir doenças relacionadas à diarreia e a contaminação dos recursos hídricos, o saneamento também contribui para melhorar as condições de vida dos cidadãos e o ambiente em que vivem. No entanto, como afirma (SOUZA, 2007), o foco principal não deve estar apenas na implantação das soluções tecnológicas de saneamento, mas sim no seu pleno funcionamento, durabilidade e acessibilidade a toda a população, incorporando estratégias de educação, participação e controle social, com o objetivo de capacitar os cidadãos e cidadãs.

3.4 EIXOS ESTRATÉGICOS: SOLUÇÕES PARA O SANEAMENTO RURAL

De acordo com o Plansab existem eixos estratégicos para abordar soluções para o saneamento básico rural no Brasil. Esses pilares estratégicos baseiam-se na integração de três eixos: gestão dos serviços, educação e participação social, e tecnologia. Esses elementos são considerados indivisíveis e essenciais para atender às demandas das populações que residem nas áreas rurais do país.

A gestão dos serviços relaciona-se amplamente com medidas estruturais, incluindo o planejamento, a regulação, a fiscalização, a prestação dos serviços e o controle social, conforme estabelecido pela Lei Federal nº 14.026/2020. Essa abordagem busca garantir que o poder público atenda à população com segurança e eficiência, promovendo a saúde e a salubridade ambiental. A educação e a participação social, assim como a gestão dos serviços, também são consideradas medidas estruturais.

Elas visam sensibilizar os usuários sobre seus direitos e responsabilidades, além de fornecer apoio técnico e pedagógico qualificado aos prestadores de serviços. Essas medidas também buscam capacitar os gestores técnicos e administrativos para melhorar o funcionamento dos serviços de saneamento básico.

3.4.1 Eixo gestão

A gestão dos serviços de saneamento requer a adoção de modelos ou alternativas que garantam a sustentabilidade econômica e financeira, com ênfase na cooperação entre os

diferentes níveis federativos. O objetivo estratégico é assegurar a saúde pública, proporcionando atendimento de qualidade, equânime, universal e integral. O planejamento, a regulação, a prestação e a fiscalização são elementos essenciais nesse processo. Uma das estratégias propostas para a gestão dos serviços é o fomento ao uso de tecnologias que facilitem a gestão do saneamento nas áreas rurais. Isso inclui a promoção da implantação de tecnologias sociais, que são abordadas no tema deste estudo. Além disso, propõe-se avaliar a necessidade de melhorias nos serviços existentes, bem como a ampliação ou implantação de novos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e manejo de águas pluviais, o que também está relacionado ao tema proposto.

3.4.2 Eixo educação e participação social

O envolvimento da população interessada na participação social e no controle, assim como o desempenho eficiente dos atores envolvidos na gestão dos serviços de saneamento, dependem de estratégias educacionais eficazes que enfatizem a formação em saneamento. Isso possibilita que a população se aproprie das soluções de saneamento e participe de forma significativa nos processos de tomada de decisão e monitoramento.

3.4.3 Eixo tecnologia

Lei Federal nº 14.026/2020 e o Plansab destacam a importância da abordagem tecnológica no saneamento básico, priorizando o uso de tecnologias adequadas às características socioambientais. As diretrizes para o esgotamento sanitário incluem a preferência por tecnologias já utilizadas, a garantia de acessibilidade financeira e o estímulo ao uso de tecnologias sociais e sustentáveis. Os sistemas descentralizados de tratamento de esgoto são uma opção promissora, promovendo saúde, reuso de efluentes e evitando a necessidade de redes de coleta dispendiosas.

O tema da pesquisa em questão está alinhado com o eixo estratégico da tecnologia como soluções para o saneamento rural, uma vez que estuda uma tecnologia social implantada, o vermifiltro, e busca propor melhorias a serem realizadas para o sistema analisado.

3.5 VERMIFILTRO

A vermifiltração é uma alternativa para o tratamento do esgoto, especialmente quando se considera as dificuldades de manutenção e operação das tecnologias tradicionais, como

filtros anaeróbios, biofiltros percoladores, filtros de areia e wetlands construídas. Diferentemente dessas tecnologias, o vermifiltro é uma unidade compacta que produz vermicomposto em vez de lodo, eliminando o odor desagradável no efluente tratado. Além disso, sua instalação e operação/manutenção são simples, o que a torna uma opção tecnicamente atrativa (SINHA et al., 2008).

O vermifiltro é um tipo de biofiltro pouco difundido que foi descrito pela primeira vez na literatura científica por SOTO E TOHÁ (1998) como uma unidade de tratamento de esgoto sanitário na Universidade do Chile. Essa tecnologia, ilustrada na Figura 1 denominada na literatura como Sistema Tohá é uma solução desenvolvida pelo Dr. José Tohá Castellá para tratar águas residuais provenientes de residências e indústrias.

Figura 1 - Esquema do Sistema Tohá.



Fonte: Tese "Evaluación ambiental del sistema tohá en la remoción de salmonella en águas servidas domésticas."

Seu objetivo principal é a descontaminação ecológica do efluente. O Sistema é composto por um vermifiltro seguido por uma câmara de desinfecção por radiação ultravioleta. O sistema recebeu uma patente e posteriormente foi aplicado em vários sistemas descentralizados no Chile (UNDP, 1998).

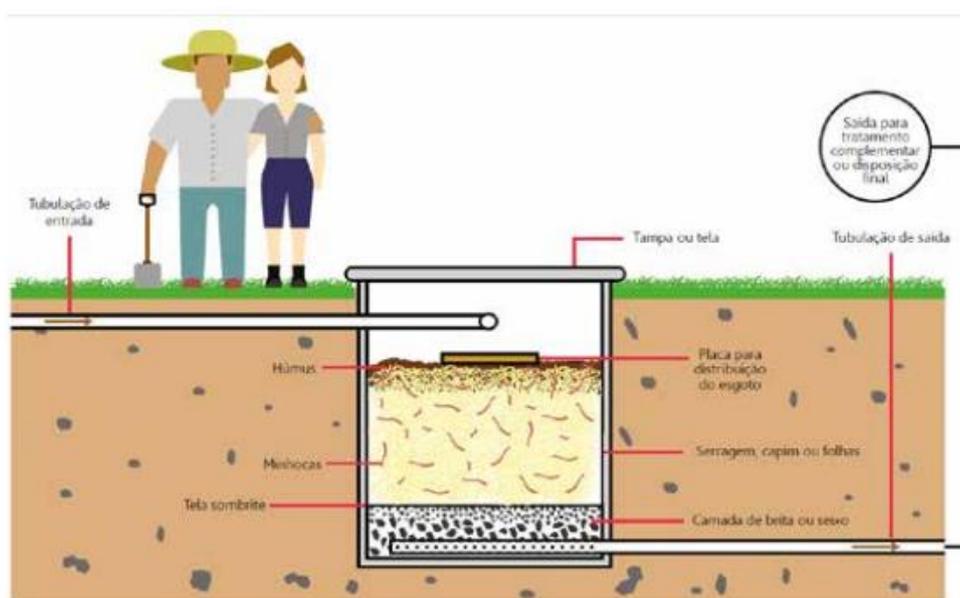
Os resultados obtidos por meio desse método demonstraram notável eficácia do sistema na remoção de matéria orgânica e microorganismos patogênicos presentes nas águas residuais (SOTO E TOHÁ, 1998).

O vermifiltro é um tipo de biofiltro percolador que recebe o esgoto de forma intermitente, com fluxo descendente por gravidade, permitindo a aeração natural do biofiltro. Isso significa que as aplicações de águas residuais ocorrem de acordo com a descarga no vaso sanitário e o uso da pia ou do chuveiro.

A camada superior de substrato contém material orgânico e minhocas epigêicas detritívoras, comumente utilizadas em processos de vermicompostagem. A presença dessas minhocas promove aeração natural, granulação de partículas argilosas e fragmentação de sedimentos e areia. Isso resulta no aumento da área superficial do meio filtrante e na capacidade de retenção de compostos orgânicos e inorgânicos. No processo, os sólidos suspensos presentes no esgoto são retidos na parte superior do vermifiltro, onde são decompostos inicialmente pelas minhocas e, em seguida, processados pelos microrganismos presentes em todas as camadas do biofiltro (SINHA et al., 2008). Além disso, o sistema digestivo das minhocas promove um aumento na diversidade de bactérias degradadoras de matéria orgânica. Dessa forma, as minhocas atuam como um complemento, melhorando a eficiência de um biofiltro percolador convencional.

Na Figura 2 está descrito o modelo de um vermifiltro genérico citado por TONETTI et al., (2018).

Figura 2 - Vermifiltro esquematizado.



Fonte: Tonetti et al., (2018).

O modelo citado por TONETTI et al., (2008) se assemelha ao protótipo de vermifiltro desenvolvido pelos pesquisadores da UNICAMP em 2016, que apresenta diâmetro de 30 centímetros e é composto por três camadas distintas. A camada superior, com 40 cm de substrato, é constituída por minhocas da espécie *Eisenia andrei*. A camada intermediária

possui 40 cm de pedrisco, enquanto a camada inferior é composta por 20 cm de brita, responsável pela drenagem do efluente tratado. Para o substrato das minhocas, foi utilizada uma mistura de braquiária (capim) seca e terra na proporção de três para um.

De acordo com Francisco José Peña e Lillo Madrid a vermifiltração é um processo de tratamento de efluentes sanitários que combina a degradação bacteriana com a vermicompostagem, resultando em um filtro biológico altamente eficiente na remoção de poluentes do esgoto. É especialmente adequado para o tratamento de efluentes em áreas que não possuem sistema de coleta de esgoto.

As vantagens da vermifiltração incluem a facilidade de instalação e operação do filtro e o baixo custo dos materiais envolvidos. Além disso, não gera lodo na unidade, o que reduz os custos adicionais relacionados ao tratamento e disposição da fase sólida. Outra característica observada por SINHA et al., (2008) é a não geração de maus odores, devido à aeração natural do meio filtrando, potencializada pelas minhocas e o sistema de vedação realizado pela tampa.

Entretanto outras fontes mencionam a necessidade de submeter o efluente a um tratamento adicional, como, por exemplo, o uso do sistema de tratamento com bananeiras, devido ao fato de que o desempenho desse tratamento específico ainda não é amplamente conhecido em relação à remoção de patógenos, mas pelo processo biológico exposto é possível que a remoção seja muito pequena.

SINHA et al. (2008) e LI et al. (2009) na literatura mostram resultados acima de 90% de remoção de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio), parâmetros utilizados para avaliar o impacto ambiental dos efluentes, porém apresentam resultados limitados acerca da remoção completa de matéria orgânica do esgoto sanitário e da remoção dos patógenos. Logo se faz necessário o tratamento terciário, em busca de uma desinfecção do afluente.

3.6 FORMAS DE DESINFECÇÃO DE EFLUENTE

A desinfecção da água é um processo fundamental para garantir a remoção ou destruição de microrganismos patogênicos, como bactérias, vírus e protozoários. Dentre as formas de desinfecção de esgoto que podem ser empregadas como tratamento complementar existem métodos distintos, que podem ser escolhidos de acordo com a necessidade e disponibilidade, incluindo o uso de agentes químicos e agentes físicos. Na desinfecção por agentes químicos pode ser empregado o uso do cloro, que é um dos métodos mais comuns, também a mistura de cloro com amônia e o uso do gás de ozônio.

Já na desinfecção por agentes físicos podem ser utilizados o processo de filtração por diferentes métodos, como filtro de areia ou carvão ativado e membranas e o uso da radiação ultravioleta.

No caso da presente pesquisa, foi estudada a desinfecção efetuada através da radiação UV, sendo adotada como fonte de emissão de radiação uma lâmpada LED UV, com diodos emissores de luz, com comprimento de onda específico para tal fim.

A motivação de tal escolha se dá por acreditar que dentre as formas de desinfecção, a realizada por agentes físicos é vantajosa pelo fato de não gerar subprodutos como na desinfecção realizada por produtos químicos. E dentre as formas de desinfecção por agentes físicos disponíveis, a efetuada pela luz LED UV se encaixa na proposta de universalização do saneamento descentralizado, como alternativa resistente, de baixo consumo energético, baixo custo e fácil instalação para ser acoplada ao sistema de vermifiltração já existente na residência que está sendo analisada.

3.7 DESINFECÇÃO POR MEIO DA RADIAÇÃO UV

Com o objetivo de buscar métodos de desinfecção alternativos aos produtos químicos, que podem gerar subprodutos prejudiciais à saúde, têm sido realizadas pesquisas para o desenvolvimento de tratamentos físicos. Um desses métodos é a utilização da radiação ultravioleta, que tem como alvo principal os ácidos nucleicos dos microrganismos presentes na água. Os vírus e bactérias são inativados pelas reações fotoquímicas provocadas pela radiação ultravioleta.

O efeito germicida da radiação ultravioleta foi inicialmente descrito por Downs & Blunt em 1878 (KOLLER, 1952). No entanto, devido à falta de tecnologia e equipamentos adequados, seu uso não foi amplamente difundido por um certo período. Com o avanço tecnológico e a superação desses obstáculos, as pesquisas relacionadas ao uso da radiação ultravioleta começaram a crescer e continuam em expansão. Isso se deve, em parte, ao custo acessível, o que torna esse método economicamente competitivo em comparação a outros, como a cloração.

No Brasil, as pesquisas sobre o uso da radiação ultravioleta iniciaram-se em 1977 na Universidade de São Paulo, na Escola de Engenharia de São Carlos (CAMPOS & PIZZARANI, 1977; DANIEL, 1993). Para realizar a inativação dos microrganismos por meio da radiação ultravioleta, geralmente são utilizadas lâmpadas especiais compostas principalmente por vapor de mercúrio ionizado. Tais lâmpadas estão disponíveis em

diferentes pressões e potências. Assim, a energia elétrica é empregada para gerar a radiação que elimina, inativa ou torna inviável o microrganismo.

A radiação ultravioleta pertence ao espectro eletromagnético, situando-se na faixa de comprimento de onda entre 40 e 400 nm. Essa faixa está localizada entre os raios X e a luz visível (KOLLER, 1952). Dentro desse intervalo, há uma subdivisão, sendo considerado UV vácuo o comprimento de onda entre 40 e 200 nm, UVC entre 200 e 280 nm, UVB entre 280 e 315 nm, e UVA entre 315 e 400 nm.

De acordo com diversas pesquisas, como observado por BOLTON (1999) a faixa de comprimento de onda entre 245 e 285 nm é considerada a faixa germicida ótima para a inativação de microorganismos. Sendo que o comprimento de onda de 254 nm, que está na faixa UVC, apresenta o maior efeito bactericida.

3.8 A DOSE DE RADIAÇÃO UV

Ao avaliar a aplicação ou avaliação do uso de radiação UV para o tratamento e desinfecção de água e esgoto, é importante levar em consideração a dosagem e o espectro eletromagnético, ou seja, o comprimento de onda utilizado. O termo "dose" de radiação ultravioleta é frequentemente empregado na literatura para representar a exposição de um organismo específico à radiação na faixa germicida. Essa dose é calculada multiplicando-se a intensidade da radiação pelo tempo de exposição à luz (DANIEL, 2001).

A sua expressão matemática é apresentada na Equação 1.

$$D = Im \times t \qquad \text{Eq. (1)}$$

Sendo:

D: Dose de radiação ultravioleta (mW.s/cm²)

Im: Intensidade de radiação (mW/cm²)

t: tempo de exposição (s)

A dose UV geralmente é expressa em mJ/cm², J/m² ou μW/cm². A inativação de um determinado número de microrganismos pode ser alcançada com um curto período de tempo e alta intensidade de radiação, ou com uma baixa intensidade ao longo de um longo período de tempo (DANIEL, 2001). O dimensionamento adequado da dose é de extrema importância, pois, se a dose não for calculada corretamente, alguns microrganismos podem se recuperar e

retomar suas atividades (DANIEL, 2001).

LI et al., (2019) sugere que a dose de UV é uma estimativa aproximada e não um valor exato. De acordo com BILOTTA E DANIEL (2012), a literatura relata que, em efluentes secundários, são utilizadas doses de UV tradicional na faixa de 30 a 45 mW.s/cm² para inativar coliformes totais, termotolerantes e *Streptococcus faecalis*, resultando em remoções de 3 a 5 log. Em seus estudos, Gonçalves et al. (2003) afirmam que uma dose de 6,6 mJ/cm² de lâmpadas convencionais de UV é necessária para inativar a bactéria *Escherichia coli*.

3.9 INATIVAÇÃO DE MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS USANDO LÂMPADAS LED UV

Conforme mencionado por DANIEL (2001), a desinfecção de efluentes de esgoto sanitário não tem como objetivo a eliminação completa de microrganismos, mas sim a remoção daqueles que representam uma ameaça ao bem-estar humano, de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos para diferentes circunstâncias. Na Tabela 1 são listados os principais microrganismos patogênicos presentes nos esgotos sanitários, que podem representar um risco para a saúde humana.

Tabela 1- Principais microrganismos patogênicos existentes nos esgotos sanitários.

| Microrganismos | Contribuição Percapita (Org/hab.d) | Concentração (org/100 ml) |
|--|---|------------------------------------|
| Bactérias | | |
| Coliformes Totais | 10 ⁹ a 10 ¹² | 10 ⁶ a 10 ¹⁰ |
| Coliformes Fecais | 10 ⁸ a 10 ¹¹ | 10 ⁶ a 10 ⁹ |
| <i>Escherchia Coli</i> | 10 ⁸ a 10 ¹¹ | 10 ⁶ a 10 ⁹ |
| <i>Salmonellae spp</i> | 10 ⁵ a 10 ⁶ | 10 ² a 10 ³ |
| <i>Streptocococ fecais</i> | 10 ⁸ a 10 ⁹ | 10 ⁵ a 10 ⁶ |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i> | 10 ⁴ a 10 ⁵ | 10 ¹ a 10 ² |
| Protozoários | | |
| Cistos de <i>Giardia sp.</i> | 10 ⁵ a 10 ⁷ | 10 ² a 10 ⁴ |
| Ooscitos de <i>Cryptosporidium spp</i> | 10 ⁴ a 10 ⁵ | 10 ¹ a 10 ² |
| Helmintos | | |
| Ovos de helmintos | 10 ⁴ a 10 ⁶ | 10 ¹ a 10 ³ |
| Vírus | | |

| | | |
|-------|-----------------|-----------------|
| Vírus | 10^5 a 10^7 | 10^2 a 10^4 |
|-------|-----------------|-----------------|

Fonte: Gonçalves et al., (2003)

Conforme mencionado por SILVA (2018), a tecnologia LED UV é uma promissora alternativa aos desinfetantes químicos, apresentando eficiência na inibição de microrganismos patogênicos e proporcionando menor impacto ambiental. Além disso, essa tecnologia oferece menor consumo energético em comparação às lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Por ser resistente e demandar baixa energia elétrica os LEDs UV podem ser utilizados com segurança em ambientes úmidos e até mesmo na água, eliminando o risco de choques elétricos diretos (OSRAM, 2009). Embora o preço de aquisição seja uma desvantagem, devido à ausência de produção nacional, é possível observar que, a longo prazo, essa tecnologia se tornará mais acessível aos usuários. A Tabela 2 compila diversos estudos que visam a remoção de microrganismos por meio da utilização de LED UV no tratamento de água.

Tabela 2 - Experimentos realizados por vários pesquisadores.

| Comprimento de onda (nm) | Microorganismo | Desinfecção | Tempo de exposição | Log inativação | Referência |
|--------------------------|--|-------------|--------------------|----------------|--------------------------|
| 254 | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Água | 30 s | 3,5 | Chevremont et al (2012b) |
| 280 | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Água | 30 s | 7 | Chevremont et al (2012b) |
| 365 | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Água | 30 s | 2.7 | Chevremont et al (2012b) |
| 365(Pulso) | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Biofilme | 1h | 3 | Li et al (2010) |
| 365(Pulso) | <i>Candida albicans</i> (107 UFC mL-1) | Biofilme | 1h | 3 | Li et al (2010) |
| 375 | <i>E. coli</i> (108 UFC mL-1) | Biofilme | 2h | 2 | Hwang et al (2013) |
| 375 | <i>Streptococcus mutans</i> (105UFC.mL -1) | Água | 15 min | 4 | Kim et al 2007 |
| 405 | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Água | 30 s | 3,3 | Chevremont et al (2012b) |
| 254/365 | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Água | 30 s | 7 | Chevremont et al (2012b) |
| 280/365 | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Água | 30 s | 7 | Chevremont et al (2012b) |
| 280/405 | <i>E. coli</i> (107 UFC mL-1) | Água | 30 s | 7 | Chevremont et al (2012b) |

Fonte: adaptado por Song et al (2018) citado por Silva (2018)

Os experimentos realizados sugerem eficiência no tratamento da bactéria *E. coli* utilizando LED UV. No entanto, como estudado por (SILVA, 2018) os resultados podem não ser conclusivos devido à influência de diversos fatores, como parâmetros químicos que podem afetar a inibição dos microrganismos. Na tentativa de diminuir a influência de tais fatores, busca-se basear os testes em apenas dois fatores: tempo de exposição e comprimento de onda.

Alguns estudos têm investigado a inativação de microrganismos utilizando LED UV e têm demonstrado que doses menores são necessárias para reduzir ou inativar esses microrganismos. Por exemplo, BOWKER et al., (2011) demonstra que uma dose de 3,3 mJ/cm² é suficiente para inativar 1 log de *E. coli*, o que significa que uma dose de 9 mJ/cm² pode inativar aproximadamente 2,7 logs do microrganismo.

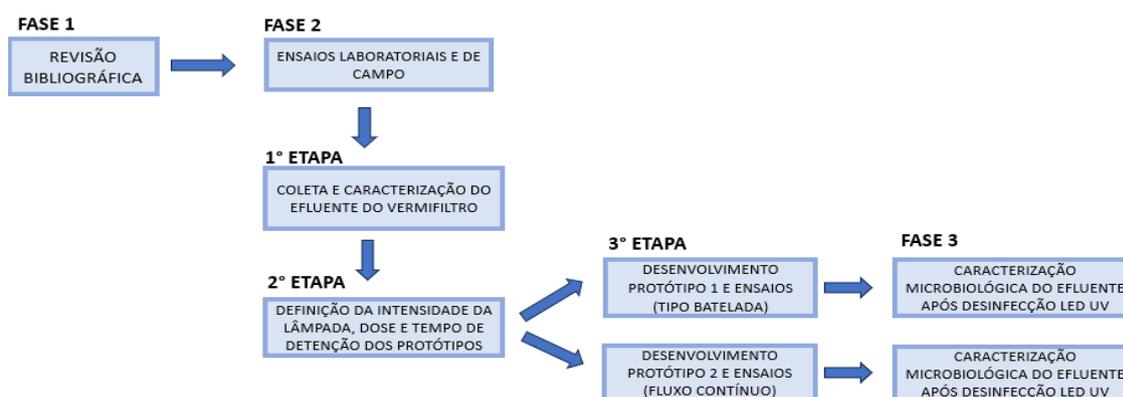
Em outras pesquisas envolvendo radiação UV, CHEVREMONT et al., (2012) observou eficiência na inativação de coliformes, com reduções variando de 2 a 7 logs em um tempo de exposição que variou de 30 segundos a 2 horas.

A dosagem necessária para a inibição de microrganismos no LED UV também é um dado promissor para sua aplicação. De acordo com BILOTTA E DANIEL (2012), a literatura relata que efluentes secundários e terciários requerem doses de radiação UV entre 30,0 e 45,0 mW.s.cm² para garantir uma redução de 3,0 a 5,0 logs no número de coliformes fecais. BOWKER et al., (2011), utilizando LED UV, alcançou uma redução de 2,7 logs de *E. coli* com uma dose de 9 mW.s.cm². Em outro estudo, KUMIKO (2018) utilizou 13,8 mW.s.cm² para reduzir 4,0 logs de *E. coli* também com o uso de LED UV. Conclui-se então que a utilização de LED UV para a inativação de microrganismos apresenta resultados promissores que indicam o potencial dessa tecnologia. Mas, para ter eficácia, é importante buscar doses adequadas a serem utilizadas para garantir reduções significativas no número de coliformes fecais e *E.coli* de efluentes secundários e terciários. Já que existe uma dosagem específica de radiação UV necessária, de acordo com as condições experimentais, para inibir microrganismos no LED UV.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em três fases e contou com a concepção de 2 protótipos, baseado em diferentes distâncias da luz emitida ao efluente a ser tratado, identificados como protótipo 1 e protótipo 2. É demonstrado no fluxograma representado na Figura 3 como foi o desenvolvimento do estudo.

Figura 3 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.



A primeira fase está relacionada com a pesquisa bibliográfica e foi explicitada na seção 3. A segunda fase está relacionada aos ensaios laboratoriais e de campo e está subdividida em 3 etapas. A primeira etapa se deu pela realização da coleta e caracterização do efluente do vermifiltro, a segunda etapa ocorreu com a definição da intensidade da lâmpada LED UV utilizada nos protótipos, a dose e o tempo de detenção hidráulica empregados. A terceira etapa transcorreu com o desenvolvimento dos protótipos e a realização dos ensaios tipo batelada e contínuo. Por fim, na terceira fase se realizou a caracterização microbiológica das amostras na saída do protótipo instalado, após receberem o tratamento com luz LED UV.

4.1 PRIMEIRA FASE

A primeira fase está relacionada com a pesquisa bibliográfica. Como é um assunto pouco abordado, a pesquisa baseia-se em artigos científicos, artigos técnicos, teses e trabalhos de conclusão de curso. Além de estudos pautados em bibliotecas disponíveis e instituições que trabalham com lâmpadas LED UV e sistemas de saneamento ecológico.

4.2 SEGUNDA FASE

4.2.1 Primeira Etapa

- **COLETA**

A coleta foi realizada durante o mês de maio, em uma residência unifamiliar com dois moradores fixos localizada no bairro São Sebastião, no município de Ouro Preto. As amostras utilizadas no protótipo 1 foram coletadas nos dias 2, 3 e 4 e as do protótipo 2 nos dias 23, 24 e 25. Esse bairro está situado no entorno do Parque Municipal Andorinhas, que abriga a cabeceira da Bacia Hidrográfica do rio das Velhas, logo a necessidade urgente de tratamento adequado dos efluentes, para contribuir com a proteção e preservação da qualidade da água do leito. Na residência referida já havia instalado um sistema de tratamento descentralizado de águas residuárias, o vermifiltro.

Como pode ser observado na Figura 4 (a) o sistema conta com uma bombona de 200L, com tubo de entrada de 200 mm e de saída de 25 mm. A Figura 4 (b) ilustra o esquema do interior do sistema, onde encontra-se acoplado ao tubo de entrada uma tela, que envolve as minhocas e a matéria orgânica, nesse caso serragem e folhas secas.

A Figura 5 mostra a parte interna do vermifiltro (vista superior), onde a parte sólida do efluente fica retida na tela sombrite para sofrer o tratamento realizado pelas minhocas e seguir para o tratamento do filtro biológico, que se encontra logo abaixo, contendo carvão e diferentes granulometrias de brita e areia. A espessura das camadas não foi especificada.

Figura 4 - Parte externa do vermifiltro instalado (a) e esquema interno (b).

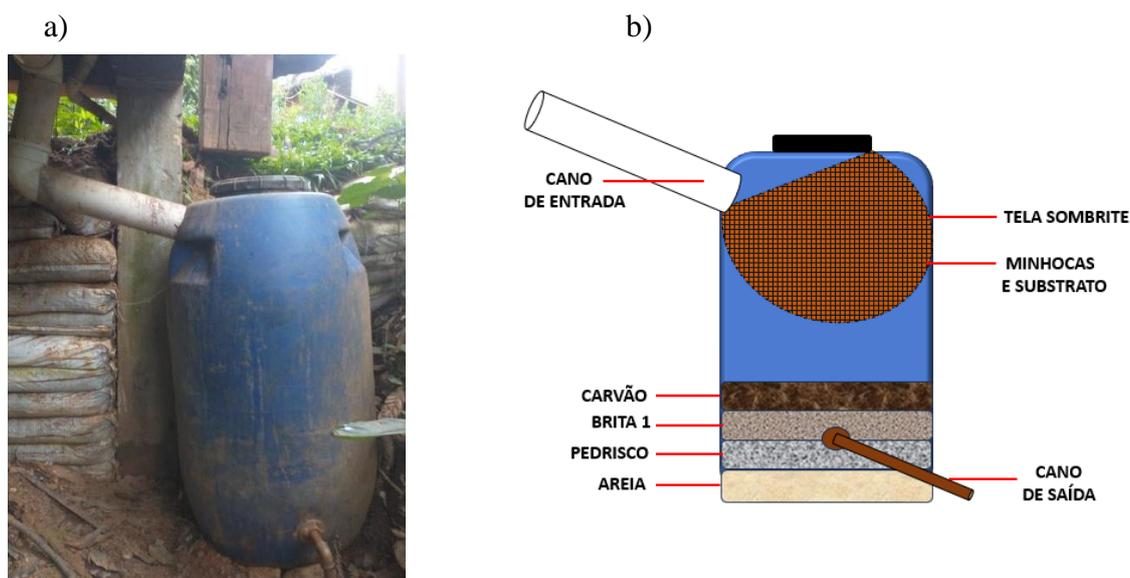


Figura 5 - Vista superior da parte interna do vermifiltro.



Fonte: Autora.

Para os ensaios com cada protótipo de desinfecção, foi realizada a coleta do efluente na saída do vermifiltro. Para isso foram utilizados galões de 20 Litros que foram acoplados ao vermifiltro e aguardou-se até a obtenção do volume necessário. No total foram 3 galões, sendo coletado 1 por dia, que somaram 46 litros de amostra para cada protótipo. A partir da amostra coletada foram realizadas as análises de caracterização prévia e os ensaios de desinfecção.

• CARACTERIZAÇÃO

A caracterização foi realizada no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFOP. Foram feitas análises de absorvância, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), condutividade, potencial de oxi-redução (ORP), pH, turbidez, coliformes totais e *Escherichia coli*.

O ORP e o pH foram medidos no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFOP, utilizando um equipamento multiparâmetro portátil da HANNA modelo HI98180. A Condutividade foi medida pelo Condutivímetro Digimed DM-32 e a Turbidez foi medida Turbidímetro HACH. A DBO foi medida através do método 5210 B (APHA, 2012). As análises microbiológicas de CT e *E.coli*, foram avaliadas no Laboratório de Microbiologia e Bioprospecção Tecnológica (LMBT) da UFOP, por meio do método Colilert 9223 B (APHA,

2012). Tal procedimento quantifica o número mais provável (NMP) de microrganismos específicos em uma amostra de 100 mL. A absorbância foi medida em Espectrofotômetro HACH DR 6000, UV/visível em cubeta de 1 cm de trajetória.

4.2.2 Segunda Etapa

A segunda etapa, está concentrada nos estudos da dosagem para inativação dos microrganismos, metodologia baseada na pesquisa desenvolvida por Malik et al., (2017). Foi realizada a definição e aquisição da lâmpada utilizada, os ensaios de medição da intensidade de radiação emitida pela lâmpada LED UV de acordo com a distância entre a lâmpada e a lâmina de água; e o tempo de detenção hidráulica necessário para atingir a dose definida.

Para verificar a inativação dos microrganismos e indicar o nível de desinfecção que ocorreu pós-tratamento com LED UV, utilizou-se a Equação 2.

$$E(\text{Log}) = \log(N_0) \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

E : Eficiência;

N_t : Corresponde ao número de colônias pós-tratamento;

N_0 : Corresponde ao número de colônias antes do tratamento.

Também se utilizou a Equação 3, que determina a unidade log removida de patógenos.

$$\text{Unidade removida} = -\log_{10}(1 - E) \quad \text{Eq.(3)}$$

- **DOSE DEFINIDA PARA OS ENSAIOS**

Na presente pesquisa, de acordo com as fontes de referências e no estudo realizado na revisão bibliográfica optou-se por utilizar uma dosagem de 30 mW.s.cm², com o intuito de garantir a inativação de 3 log. Tal valor foi aferido nas referências como a inativação alcançada para o menor valor de dosagem utilizada.

- **MODELOS DE LÂMPADAS**

A lâmpada definida para o uso durante a pesquisa, foi escolhida levando em consideração as opções disponíveis no mercado, pensando na disponibilidade de acesso futuro dos usuários do protótipo de desinfecção. Ocorreu uma pesquisa de mercado, com foco em adquirir uma lâmpada que atendesse às especificações referentes ao projeto proposto, com

comprimento de onda definido na faixa UVC de 254nm. Dentre as lâmpadas disponíveis optou-se por adquirir uma lâmpada LED UV, com dimensões de 50x50x185 mm, composta por liga de alumínio e plástico, com potência de 60W, tensão alternada contínua 100-277V e comprimento de onda de 254nm. A lâmpada foi adquirida pela internet, através do Mercado Livre, disponível em: < <https://www.mercadolivre.com.br/>>, de uma distribuidora localizada na China, pelo valor de R\$ 154,32. A imagem que ilustra o produto adquirido pode ser vista no anexo A.

- **ENSAIO DE MEDIÇÃO DE INTENSIDADE DA LÂMPADA**

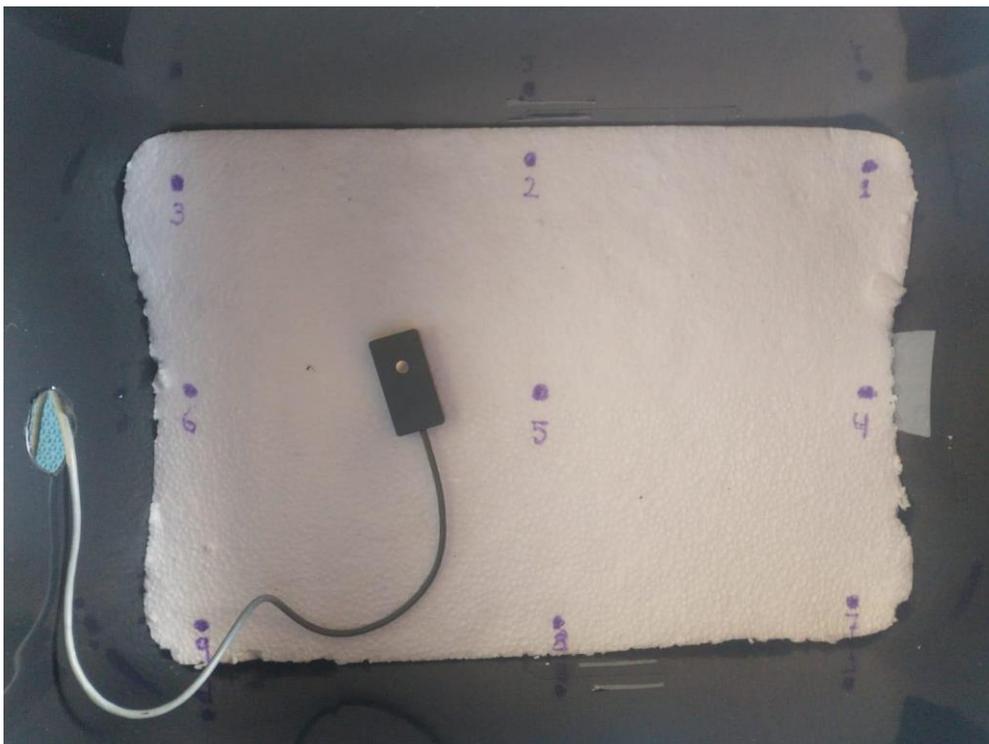
Foi realizado o ensaio de medição de radiação UV emitida, para dar seguimento à pesquisa e definir a distância entre a lâmpada e a lâmina d'água e o tempo de exposição necessário para ocorrer a inativação dos patógenos em estudo. Assim, foi utilizado para medição o Radiômetro MULTI SENSE 100, 125 UV- C Sensorial 072701-01, com unidade de medida mW/cm².

Para a construção foi utilizada uma caixa de papelão adaptada, para impedir o recebimento da radiação pelos pesquisadores. Na caixa foi acoplada a lâmpada e foram determinadas as distâncias de medição. Com o equipamento ligado, foram medidas, em trélicas, as intensidades da lâmpada em distintas distâncias.

- **INTENSIDADE DO PROTÓTIPO 1 (REATOR DE 56 L)**

Para os ensaios do protótipo 1, foi definida a distância entre a lâmpada e a lâmina d'água como 15 cm, a maior distância possível entre lâmpada e lâmina d'água. Logo utilizou-se a intensidade aferida da lâmpada para tal distância, de 0,1 mW.cm². Foi feita uma medição de radiação emitida pela lâmpada LED UV, com uma placa de isopor acoplada no fundo do reator do protótipo 1 simulando a altura da lâmina de água de 5 cm. O valor utilizado nos ensaios, foi o de 0,10 mW/cm², referente à distância de 15 cm. Ainda assim, mediu-se o valor em 12 pontos distintos na área da caixa, como mostra a Figura 6, e a partir daí definiu-se a intensidade média de 0,17mW/cm².

Figura 6 - Medição da intensidade com radiômetro no protótipo 1.

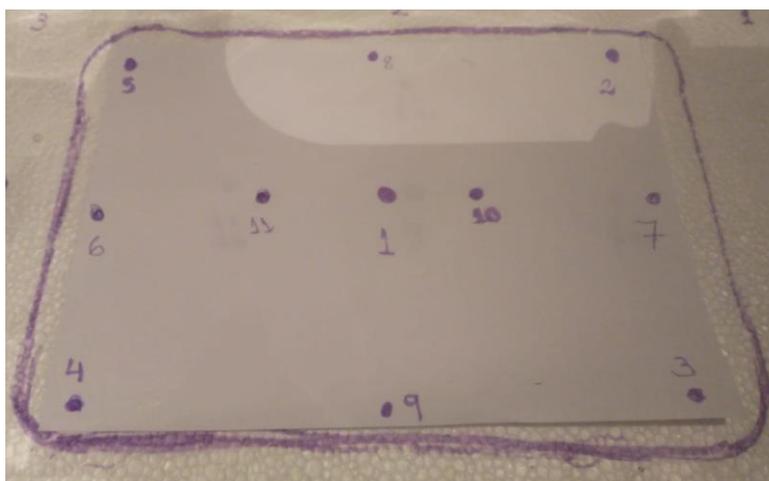


- **INTENSIDADE DO PROTÓTIPO 2 (REATOR DE 19 L)**

Para os ensaios do protótipo 2 foi fixada uma distância de 3 cm entre a lâmpada e a lâmina d'água, o mínimo possível para garantir maior intensidade e evitar que a lâmpada entre em contato com a água.

Realizou-se o ensaio de intensidade de emissão de radiação em toda a área de superfície de contato do efluente na caixa, sendo medidos 11 pontos, explicitados na Figura 7, em distâncias distintas do ponto focal de máxima influência da radiação UV da lâmpada, localizado logo abaixo da mesma.

Figura 7 - Posicionamento dos pontos na área definida para protótipo 2.



A partir dos valores obtidos na medição realizou-se a média, encontrando o valor a ser inserido na Equação 4, de Intensidade média (I_m) de Beer-Lambert, para então ser utilizada na Equação 1 de Dosagem.

$$I_m = \frac{I_o}{aL} [1 - \exp(-aL)] \quad \text{Eq. (4)}$$

Sendo:

I_o = intensidade de radiação ultravioleta na superfície da água(mW/cm²)

I = intensidade de radiação ultravioleta na profundidade L(mW/cm²)

I_m = intensidade de radiação ultravioleta na lâmina líquida de espessura L(mW/cm²)

L = espessura da lâmina líquida(cm)

a = coeficiente de extinção(cm⁻¹)

O valor de a foi definido pela Equação 5 a partir da Absorbância obtida na Caracterização.

$$a = 2,303A \quad \text{Eq.(5)}$$

Onde:

A = absorbância(24nm) (Valor definido no ensaio de caracterização do efluente de 1,71)

Fonte: (Daniel,2001).

Logo, foi utilizado na Equação 4 o valor de a de 3,938.

4.2.3 Terceira Etapa

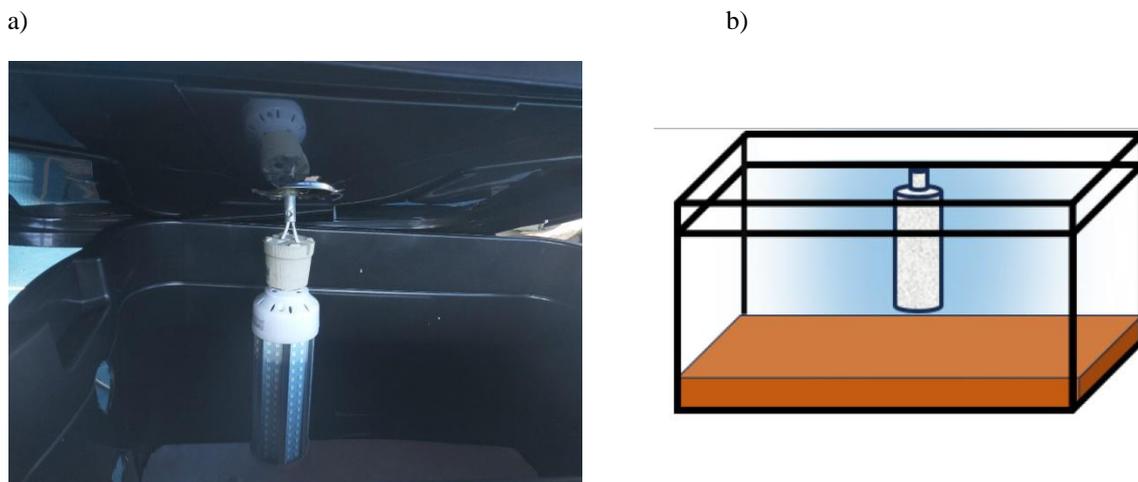
A terceira etapa concentrou-se na construção dos protótipos 1 e 2 e na realização dos ensaios do tipo batelada e fluxo contínuo.

- **DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO 1(REATOR DE 56 L)**

Foi desenvolvido um protótipo a ser acoplado ao final do tratamento da água fecal, com volume específico. O protótipo, ilustrado na Figura 8 (a) e 8 (b), conta com uma caixa organizadora de 56 Litros, com dimensões 46x33x31cm, disponível no laboratório e com

uma lâmpada LED UV inserida na tampa da caixa adaptada, que permite a detenção do afluente em determinado tempo necessário para ocorrer a desinfecção de acordo com a dosagem solicitada.

Figura 8 - Protótipo 1 desenvolvido (a) e esquema do protótipo 1 (b).



Após a montagem do protótipo foram realizados os ensaios do tipo batelada com as amostras recolhidas em campo. A partir daí foi definido por método de medição manual o volume necessário para obter tal distância, contendo uma faixa fixa de água de 5 cm, o volume foi de 7,6 L dentro da caixa.

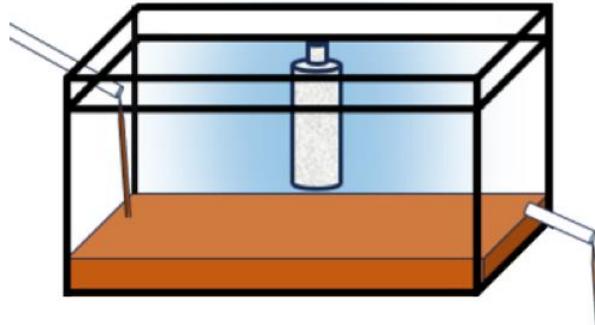
Os ensaios ocorreram em formato de batelada com o efluente coletado, no total de 4 bateladas, com o volume fixo de 7,6 L a cada ensaio. De acordo com os estudos realizados na revisão bibliográfica, para a desinfecção do efluente é necessária uma dose de 30 mW/s. Tendo a intensidade definida de 0,1 mW.cm², de acordo com a distância de 15 cm entre a lâmpada e lâmina de água, foi possível obter o tempo de exposição do efluente à radiação UV emitida pela lâmpada no protótipo. A partir da Equação 1 foi definido o tempo de detenção de 5 minutos. Ao final de cada batelada foram retiradas as amostras e levadas para realização da análise quantitativa de *E.coli* presente nas amostras finais.

- **DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO 2 (REATOR DE 19 L)**

No desenvolvimento do protótipo 2, utilizou-se uma caixa com área inferior ao protótipo 1, com 19 L de volume total e dimensões de 33x23x23cm. Em busca de melhores resultados, foi definido para o reator um volume menor, para testar o desempenho em relação à emissão de radiação. Foi fixada nova distância entre a lâmpada e a lâmina d'água de 3 cm,

o mínimo possível para garantir maior intensidade e evitar que a lâmpada entre em contato com a água. O esquema do protótipo pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema do protótipo 2.



O nível de água dentro da caixa foi mantido em 5 cm, e encontrou-se o novo volume de água de 4 L, a partir de medição direta. Tendo a intensidade média definida e a dose fixa, foi determinado através da Equação 1 o tempo de 49 minutos de detenção hidráulica. Para se aproximar mais da situação real, optou-se por fazer o ensaio de fluxo contínuo utilizando uma moto bomba submersa de aquário, do modelo mini A, da marca Grupo Sario, para simular a vazão na residência unifamiliar onde se encontra o vermifiltro.

Como as bombas disponíveis no laboratório não atendiam à vazão estimada de 4,8 L/h, optou-se pela moto bomba que atende uma vazão de 60 a 120 L/h e foi realizada uma adaptação na mesma, com estrangulamento da mangueira para atingir a vazão necessária de 0,08 L/min. A vazão necessária foi definida a partir da Equação 6.

$$Q = \frac{Vol}{TD} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde: $Q = \text{vazão}(L/min)$

$Vol = \text{Volume}(L)$

$TD = \text{Tempo de detenção hidráulica}(min)$

As Figuras 10 e 11 a seguir ilustram o modelo desenvolvido.

Figura 10 - Vista superior do protótipo 2 adaptado com bomba submersa.



Figura 11 - Vista lateral do protótipo 2 com a lâmpada em funcionamento.



A Figura 12 mostra o protótipo 2 durante a realização do ensaio do tipo fluxo contínuo. Inicialmente o efluente foi depositado em um balde, onde encontra-se acoplada a bomba, que bombeia o material para dentro da caixa, onde está instalada a lâmpada LED UV.

Figura 12 - Protótipo 2 em funcionamento durante a execução do ensaio.

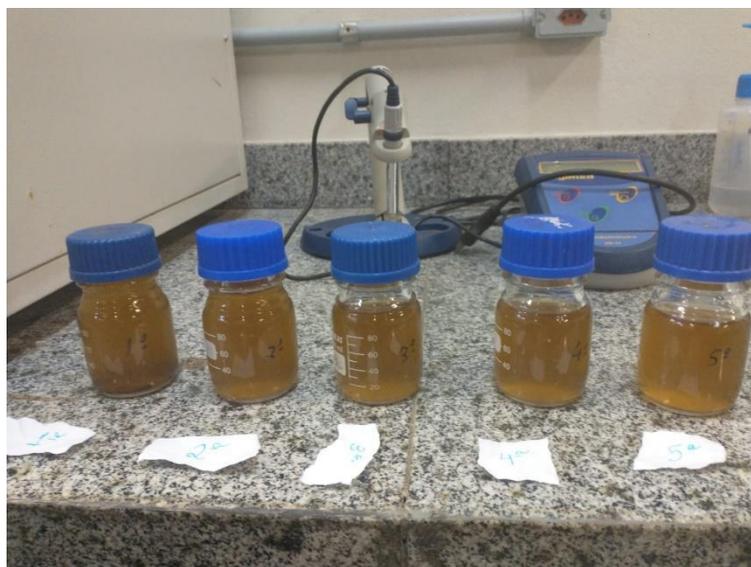


Como o tempo de detenção hidráulica é de 49 minutos foram retiradas 5 amostras. Sendo uma antes do efluente passar pelo tratamento e outras 4 em tempos distintos do tratamento. A segunda amostra foi retirada após atingido o tempo de detenção de 49 minutos. Decidiu-se dobrar o tempo para ver se os resultados seriam melhores e assim a terceira amostra foi retirada após 98 min, a quarta após 147 min, a quinta após 196 min.

4.3 TERCEIRA FASE

Após a realização dos ensaios de desinfecção no protótipo 1, foram retiradas amostras para caracterização microbiológica do efluente pós-tratamento terciário de desinfecção por luz LED UV. A não possibilidade de quantificação, indicou que a distância entre o efluente e a lâmpada estava inadequada. Assim, optou-se pelo desenvolvimento do protótipo 2 e para a determinação quantitativa de *E.coli* presente no efluente pós-tratamento terciário de desinfecção por luz LED UV, as amostras foram submetidas à diluições de 10^2 , 10^4 , 10^6 , ilustradas pela figura 13.

Figura 13 - Amostras coletadas do efluente após tratamento no protótipo 2.



5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE APÓS VERMIFILTRO UTILIZADO NOS PROTÓTIPOS (PRIMEIRA FASE).

A caracterização dos efluentes coletados após tratamento no vermifiltro, a serem testados nos ensaios dos protótipos 1 e 2, contaram com ensaios de absorvância, DBO, condutividade, ORP, pH e turbidez. Os valores seguem explicitados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização para protótipo 1 e protótipo 2.

| ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO | PROTÓTIPO 1 | PROTÓTIPO 2 |
|--------------------------|-------------|-------------|
| ORP | 82,5 Mw | 84,7 Mw |
| pH | 8,12 | 8,27 |
| DBO | 120mg/L | 80mg/L |
| TURBIDEZ | 42,8 uT | 85,9 uT |
| ABSORVÂNCIA (254Nm) | 1,71 | 1,71 |
| CONDUTIVIDADE ELÉTRICA | 4,21 mS/cm | 4,14 mS/cm |

5.2 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO EMITIDA PELA LÂMPADA EM DISTÂNCIAS DISTINTAS. (SEGUNDA FASE)

Foram obtidos os valores de intensidade emitida de radiação UV referente às distâncias variáveis entre o aparelho medidor e a lâmpada. O resultado segue apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Intensidade de radiação de acordo com a distância entre a lâmpada e o radiômetro.

| DISTÂNCIA ENTRE LÂMPADA E MEDIDOR(cm) | INTENSIDADE (mW.cm ²) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 1,53 |
| 1 | 1,1 |
| 2 | 1,05 |
| 3 | 0,9 |
| 4 | 0,72 |
| 5 | 0,56 |
| 6 | 0,45 |
| 7 | 0,37 |
| 8 | 0,29 |
| 9 | 0,24 |
| 10 | 0,21 |
| 11 | 0,17 |
| 12 | 0,15 |
| 13 | 0,13 |
| 14 | 0,11 |
| 15 | 0,1 |

5.3 INTENSIDADE

- PROTÓTIPO 1

A intensidade utilizada nos ensaios tipo batelada foi a definida de 0,1 mW/cm² para uma distância de 15 cm entre lâmpada e lâmina de água. Também foi definida a intensidade média de 0,17mW/cm² a partir da medição da intensidade emitida em cada um dos 12 pontos distribuídos em toda a área do reator, e observou-se que a intensidade varia significativamente em cada ponto. Os resultados obtidos seguem expostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Intensidades em cada ponto definido.

| POSIÇÃO DE PONTOS NA DISTÂNCIA DE 3 cm ENTRE LÂMPADA E MEDIDOR | INTENSIDADE (mW.cm²) |
|---|--|
| 1 | 0,02 |
| 2 | 0,03 |
| 3 | 0,01 |
| 4 | 0,02 |
| 5 | 1,56 |
| 6 | 0,02 |
| 7 | 0,01 |
| 8 | 0,04 |
| 9 | 0,01 |
| 10 | 0,05 |
| 11 | 0,14 |
| 12 | 0,13 |
| SOMATÓRIO FINAL | 2,04 |

O valor utilizado de 0,1 mW/cm² foi o da intensidade de radiação ultravioleta na superfície da água (I_o), e não o da intensidade de radiação ultravioleta na lâmina líquida de espessura L(I_m).

- **PROTÓTIPO 2**

A intensidade utilizada nos ensaios tipo fluxo contínuo foi a de radiação ultravioleta na lâmina líquida de espessura L(I_m). Para definir tal valor primeiro definiu-se a média das intensidades obtidas em cada ponto. Como mostra na Tabela 6 foram medidos 11 pontos de referência e obteve-se a média, com valor de 0,2 mW.cm².

Tabela 6 - Intensidades em cada ponto definido.

| POSIÇÃO DE PONTOS NA DISTÂNCIA DE 3 cm ENTRE LÂMPADA E MEDIDOR | INTENSIDADE (mW.cm²) |
|---|--|
| 1 | 1,53 |
| 2 | 0,02 |
| 3 | 0,02 |
| 4 | 0,03 |
| 5 | 0,05 |
| 6 | 0,08 |
| 7 | 0,07 |
| 8 | 0,06 |
| 9 | 0,03 |
| 10 | 0,12 |
| 11 | 0,15 |
| SOMATÓRIO FINAL | 2,16 |

Em seguida esse valor foi inserido na Equação 4 de Intensidade média (I_m) e encontrou-se o valor final a ser utilizado na Equação 1 de Dosagem.

$$I_m = \frac{0,2}{3,938 \times 5} [1 - \exp(-3,938 \times 5)]$$

$$I_m = 0,0101 \text{ mW.cm}^2$$

O valor de I_m foi inserido na Equação da dosagem e encontrou-se o tempo de detenção hidráulica de 49 minutos.

$$30\text{mW/cm}^2 = 0,0101 \times t$$

$$t = 2970 \text{ s}$$

5.4 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

- PROTÓTIPO 1

A leitura quantitativa de *E.coli* com uma diluição de 10^2 ultrapassou $2,49 \times 10^5$, que indica uma concentração elevada dessa bactéria em uma amostra. Pelo fato da concentração de *E.coli* na amostra ter sido muito alta, ultrapassou a capacidade do método de fornecer uma leitura precisa e explicitou a necessidade de diluição maior da amostra em uma nova proporção, para que a concentração da bactéria analisada do efluente fique dentro da

capacidade de medição do método utilizado. Por tal motivo, optou-se por seguir a pesquisa com o desenvolvimento do protótipo 2.

- **PROTÓTIPO 2**

Para as amostras do protótipo 2 foram realizadas diluições maiores e foi possível medir a quantidade de *E. coli* presente no efluente com duas diluições. A Tabela 7 abaixo mostra os resultados quantitativos de *E. coli* e CT. Sendo a amostra identificada na Tabela 7 como Amostra Bruta referente ao efluente pós vermifiltro, e as amostras 1, 2, 3 e 4 referentes ao efluente após passar pelo tratamento do protótipo 2, nos tempos de detenção hidráulica de 49 minutos, 98 min, 147 min e 196 min respectivamente.

Tabela 7 - Caracterização Microbiológica das 5 amostras.

| | Coliformes Totais | <i>E. coli</i> |
|---------------|--------------------------|-----------------------|
| Amostra Bruta | $5,53 \times 10^7$ | $1,986 \times 10^7$ |
| Amostra 1 | $5,06 \times 10^7$ | $1,413 \times 10^7$ |
| Amostra 2 | $5,17 \times 10^7$ | $1,553 \times 10^7$ |
| Amostra 3 | $5,35 \times 10^7$ | $1,986 \times 10^7$ |
| Amostra 4 | $5,71 \times 10^7$ | $2,419 \times 10^7$ |

5.5 EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO

Utilizando a Equação 2 e Equação 3 encontrou-se a eficiência de remoção e a unidade log removida obtidas nas amostras coletadas ao final do ensaio de desinfecção do efluente do protótipo 2. As amostras não demonstraram remoção dos patógenos. Os valores foram calculados e expostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Eficiência de remoção das amostras 1 e 2.

| | | N0 (NMP/100 ml) | N (NMP/100 ml) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| AMOSTRA 1 | Dose (mW/cm ²) | | 30 |
| | Escherichia coli | $N_0 = 1,98 \times 10^7$ | $1,413 \times 10^7$ |
| | Log(N/N0) | | -0,1474 |
| | Eficiência (%) | | 28 |
| AMOSTRA 2 | Dose (mW/cm ²) | | 30 |
| | Escherichia coli | $N_0 = 1,98 \times 10^7$ | $1,553 \times 10^7$ |
| | Log(N/N0) | | -0,1068 |
| | Eficiência (%) | | 22 |

6 DISCUSSÃO

De acordo com a DNCOPAM-CERH/MG Nº 8, DE 21 DE NOVEMBRO DE 2022 (DELIBERAÇÃO NORMATIVA DO CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL E O CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS), que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, a Classe 2, na qual se encontra parte da Bacia do Rio das Velhas que passa por Ouro Preto, pode ter as seguintes destinações:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000, ou norma que a substitua;
- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto;
- e) à aquicultura e à atividade de pesca.

Seguindo a normatização citada no Artigo 12, para a Classe em questão, as concentrações e os valores máximos estabelecidos para os parâmetros relacionados em cada uma das classes de enquadramento deverão ser obedecidos nas condições de vazão de referência.

Sendo que se um estudo sobre a capacidade de autodepuração de um corpo de água mostrar que as concentrações mínimas de Oxigênio Dissolvido (OD) não serão violadas, desde que as condições de vazão de referência sejam mantidas, exceto na zona de mistura, então os limites de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) estabelecidos para as águas doces das Classes 2 e 3 podem ser aumentados. Essa decisão se baseia em modelos reconhecidos nacional ou internacionalmente.

De acordo com a Resolução da COPAM, Nº 8/2022, Seção II, Das Condições e Padrões para Efluentes de Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários, a DBO 5 dias a 20º(grau Celsius) pode chegar até 60 mg/L(miligrama por Litro) ou tratamento com eficiência de redução de DBO 5 dias a 20ºC (grau Celsius) em no mínimo 60% (por cento). Assim, o tratamento em questão não atende ao parâmetro definido pela resolução em termo de lançamento, sendo que a DBO obtida varia entre 80 e 120 mg/L e não é possível obter a

eficiência, já que a DBO do efluente bruto é desconhecida. Entretanto, no caso da pesquisa o efluente é disposto no solo, e como se enquadra em outro adendo da resolução, referente a soluções individuais de tratamento de esgoto sanitário, não existe a necessidade de atender a resolução em termos de lançamento.

Quando esse nível é equiparado a outros tratamentos de esgoto rural descentralizado se mostra satisfatório, já que de acordo com NUVOLARI (2003), os níveis de DBO para esgoto doméstico costumam variar entre 100 e 400 mg L⁻¹. Logo, o tratamento realizou diminuição significativa no nível de DBO do efluente. Se comparando o nível mínimo de 80 mg/L obtido com o máximo estimado de 400 mg/L de um esgoto doméstico, existiria a remoção de 80%.

Em comparação com os resultados apresentados por OLIVEIRA (2018), a DBO do final da última caixa do sistema proposto de Fossa Séptica Biodigestora do modelo da Embrapa instalada em Cachoeira do Campo, estudada pela autora, apresentou valores entre 8,7 e 92 mg/L. O que demonstra que o valor encontrado no presente estudo se equipara ao obtido por efluentes advindos de sistemas descentralizados de esgotamento doméstico.

Para o parâmetro do pH a DNCOPAM, N° 8/2022, assim como a CONAMA, N° 430/2011, estipula um valor entre 6 e 9. Esse valor foi atendido, uma vez que o pH obtido no efluente foi de 8,27. Ainda em comparação com os resultados apresentados por OLIVEIRA (2018), o efluente final na saída do 3° reator da Fossa Séptica Biodigestora, apresentou pH médio de 8,08, o que indica a alcalinização do efluente ao longo do tratamento, sendo que o afluente apresentava um pH médio de 6,95. O que se assemelha ao efluente final do vermifiltro apresentado na pesquisa. Tal comparação permite avaliar o sistema de vermifiltração como eficiente na finalidade de alcalinização do efluente, além de atender ao estabelecido como aceitável pela legislação do Estado.

Referente à turbidez, de acordo com os limites legais, o valor permitido para o lançamento de efluentes de tratamento de esgoto varia dependendo da classe do corpo receptor onde será realizado o descarte, sendo 100 para Classe 2. Logo, pelo efluente do vermifiltro do trabalho em questão pertencer à Classe 2, a turbidez verificada de 85,9 UT corresponde à faixa dentro o permitido.

A proposta do presente estudo foi a avaliação de remoção dos patógenos existentes no efluente do vermifiltro por meio da tecnologia de luz LED UV. Porém, o efluente analisado apresenta níveis de turbidez e absorvância alto quando comparado ao utilizado normalmente em processos de tratamento como esse, o que compromete a eficiência do tratamento implementado. Na pesquisa realizada por DANIEL (2001), o máximo de turbidez do efluente

a ser submetido à remoção ultravioleta é 2UT, sendo que o nível de turbidez do efluente em estudo é de 85,9 UT e não existem trabalhos disponíveis que tenham realizado a desinfecção pela tecnologia de radiação UV em níveis tão altos de turbidez.

Nos resultados acerca do nível de turbidez do efluente da vermifiltração exposto por SARTORI (2010), foi encontrada uma variação de valores médios de turbidez de 5,73 a 38,17 UT para os efluentes coletados dos vermifiltros constituídos de lixo orgânico compostado, bagaço de cana e serragem de madeira submetidos à taxa de aplicação de 0,5; 1,0 e 1,5 m³ m⁻² d⁻¹; valor esse menor que o exposto no presente trabalho. Logo, o nível encontrado por ser muito elevado, se mostra como um impeditivo para um tipo de remoção ultravioleta proposta nesta pesquisa; mostrando uma limitação para aplicação dessa tecnologia quando se objetiva um tratamento terciário para remoção de patógenos em sistemas domiciliares como esse.

De acordo com SOUZA (2000) para os ensaios realizados com radiação ultravioleta, a água apresentando baixa turbidez obteve elevada inativação bacteriana (remoções maiores do que 5 log com baixa intensidade de radiação), enquanto que águas com turbidez elevada apresentaram baixa inativação (remoções menores que 1 log com elevada intensidade de radiação).

Para a absorvância, similarmente observado por DANIEL (2001), a do efluente a ser tratado pela tecnologia de radiação UV era de 0,06. Valor esse que facilita a passagem das ondas de radiação através do líquido e possibilita a realização da desinfecção por meio da inativação do microrganismo atingido. Como o valor obtido na pesquisa em questão se mostra bem mais elevado, (1,71), conclui-se que os raios de comprimento de onda na faixa UV podem ser impedidos de alcançar os microrganismos, o que afeta negativamente a inibição dos patógenos.

Diante do exposto, o estudo em questão se mostra importante na área do saneamento ambiental, abrindo caminhos para pesquisas envolvendo radiação ultravioleta emitida por diodos emissores de luz na desinfecção de efluentes terciários de sistemas de vermifiltração.

Devido à complexidade de adoção dos processos convencionais de tratamento de esgoto doméstico, e a falta de oferta de saneamento no município, a proposta de sistemas de esgotamento alternativos, descentralizados e acessíveis é de grande valia. Portanto, pesquisas que proponham melhorias e adaptações à sistemas já existentes de saneamento ecológico, além de avaliar o funcionamento dos sistemas já instalados, trazem contribuição pertinente para a área e podem despertar interesse da comunidade em optar por práticas de tratamento de esgoto doméstico ecológicas e sustentáveis.

Por estimular a discussão e adoção de sistemas alternativos de saneamento, a iniciativa da pesquisa se faz necessária na construção de soluções acessíveis e aplicáveis no processo de preservação dos leitos de água presentes na cidade, além da disseminação da consciência ambiental e sanitária. Estudo esse que abre caminhos e possibilita intervenções futuras na área e continuidade no movimento de aprimoramento e implementação de tecnologias sociais que proporcionem condições adequadas de salubridade ambiental às populações.

7 CONCLUSÃO

As principais características da vermifiltração, conforme destacado na produção científica, revelam que esse sistema é um processo de tratamento de esgoto que combina a degradação bacteriana com a vermicompostagem, resultando em um filtro biológico eficiente na remoção de poluentes. Uma unidade compacta que utiliza minhocas para promover a decomposição da matéria orgânica, aumentando a eficiência de um biofiltro percolador convencional e produzindo vermicomposto em vez de lodo. Além de possuir fácil instalação e operação, apresenta baixo custo, não gera lodo nem mal odor. No entanto, para remoção completa de matéria orgânica e patógenos, pode ser necessário um tratamento adicional, como o uso de sistemas de tratamento com bananeiras ou desinfecção terciária. Estudos mostram alta remoção de DBO e DQO, mas resultados limitados em relação à remoção completa de matéria orgânica e patógenos, exigindo tratamento adicional.

A desinfecção germicida por meio da tecnologia de luz LED UV é uma alternativa promissora aos desinfetantes químicos, sendo eficiente na inibição de microrganismos patogênicos e causando menor impacto ambiental. Além disso, os LEDs UV possuem menor consumo energético em relação a lâmpadas incandescentes e fluorescentes, além de resistência e segurança em ambientes úmidos e na água, eliminando risco de choques elétricos diretos. No entanto, a eficácia da inativação de microrganismos utilizando doses menores de radiação UV por meio de LED pode variar dependendo das condições específicas em que são aplicadas, tendo influência de fatores como parâmetros químicos, que ainda é pouco conhecida. Além disso, o preço de aquisição inicial dos LEDs UV pode ser uma desvantagem, embora se espere que, a longo prazo, a tecnologia se torne mais acessível.

A avaliação da qualidade do efluente gerado pelo vermifiltro se baseou nas especificações propostas pela COPAM, Nº 8/2022 para efluentes de esgotamento sanitário, e os resultados se mostraram em conformidade com o que foi definido para a parametrização de pH e Turbidez. Já o nível de Demanda Bioquímica de Oxigênio não atende ao parâmetro definido pela resolução. Além disso, os parâmetros de caracterização referentes à pH e DBO do efluente analisado foram comparados aos parâmetros de efluentes de outros sistemas de tratamento ecológico e se mostraram satisfatórios em relação ao esperado para um tratamento como o proposto, com a possibilidade de remoção de DBO entre 70 e 80%, considerando a DBO inicial máxima de 400 mg L⁻¹ apresentada por NUVOLARI (2003).

O desenvolvimento do protótipo foi possível, no entanto foram encontradas limitações referentes ao desempenho na desinfecção proposta, mesmo utilizando doses apropriadas de

30 mW.s.cm² para inativação de *E.coli* no nível de 3 log. A tecnologia de luz LED UV acoplada ao sistema de vermifiltro é simples e de baixo custo, que pode transformar efluentes oferecendo vantagens ecológicas, mas com limitações relacionadas à eficácia no processo de desinfecção. A distância entre a lâmpada e a lâmina d'água afeta a intensidade da radiação recebida pelo efluente, sendo que uma maior distância resulta em menor intensidade e prejudica o processo. Além disso, altos níveis de Turbidez e Absorbância do efluente limitam o alcance da radiação aos microrganismos e comprometem a eficácia do tratamento.

Diante do objetivo de avaliar o potencial da luz LED UV como um complemento no tratamento e desinfecção do efluente proveniente do vermifiltro, e identificar as limitações e potencialidades dessa tecnologia, observou-se que pesquisas que proponham implantação, melhorias e adaptações à sistemas de saneamento ecológico são de grande valia, perante a falta de oferta de saneamento no município.

Foi realizada uma tentativa como proposta de solução de um problema muito recorrente no saneamento rural, compreendendo os fatores que limitam sua aplicação e possibilitando aprimoramento futuro do sistema proposto.

Ao final o trabalho propõe algumas alternativas, que foram analisadas com base no andamento da pesquisa, que podem ser utilizadas para melhorias do desempenho da desinfecção por LED UV no modelo proposto.

Para alcançar o objetivo de utilizar a tecnologia LED UV no sistema estudado, tendo em vista que uma das maiores limitações foi o índice elevado de turbidez, é possível realizar melhorias no sistema de vermifiltração, para conseguir uma redução desse índice. Assim, seria possível remanejar a espessura das camadas componentes do filtro no interior do vermifiltro, com um aumento das espessuras das camadas e adequação da localização da tubulação, a ser posicionada logo abaixo da camada de areia. Além disso, para diminuir a turbidez do efluente, existe a possibilidade de instalar uma caixa de decantação ao final do sistema de vermifiltração, antes do efluente passar pelo protótipo.

Outra possibilidade se relaciona ao tempo de detenção hidráulica, com a opção de aumentar o mesmo. Como no trabalho foi considerada a média da intensidade ao invés da mediana, as discrepâncias geradas devido à tal adoção podem ter levado a alterações significativas na obtenção do tempo de detenção hidráulica. Assim, o tempo utilizado pode ser bem inferior ao que seria indicado utilizar caso fosse adotada a mediana. Nesse caso, haveriam as possibilidades de realizar os ensaios com maior tempo de detenção hidráulica, de aumentar a dose utilizada ou agregar mais lâmpadas ao modelo.

REFERÊNCIAS

- Programa Nacional de Saneamento Rural- FUNASA
Métodos Alternativos de Desinfecção da Água – PROSAB
- BRASIL. Plano Nacional de Saneamento (PLANSAB). Ministério das Cidades, 2012.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Plano Nacional de Saneamento Básico- PLANSAB Versão Revisada. 2019
- BRASIL.LEI Nº 11.445 DE 05 DE JANEIRO DE 2007
- PORTAL SANEAMENTO BÁSICO. Saneamento Básico.Disponível em:
<<https://www.saneamentobasico.com.br/saneamento-basico/>>.
- BOLTON, J.R. (1999). Light compendium: ultraviolet principles and applications. E9A-NeuzZetter, n.66, p.9-31.
- CAERNS, W.L. (1995). UV technology for water supply treatment. Water SuppZy, v.13, n.3/4, p.h11-h14.
- TONETTI, A. L. et al. Tratamento De Esgotos Domesticos Em Comunidades Isoladas. . Biblioteca/Unicamp. Campinas, São Paulo, 2018
- ESREY, Steve et al. Assainissement écologique. Sida, Estocolmo , 1998.
- BECK, S. UV LED Disinfection. Eawag, n. April, 2018.
- DANIEL, L. A. Métodos Alternativos de Desinfecção da Água. Sao Paulo, 2001.
- BILOTTA, PATRICIA; DANIEL, L. A. Utilização de lâmpadas germicidas na desinfecção de esgoto sanitário. Revista Ambiente e Agua, n. 3, 2012.
- COSTA, C. C. da; GUILHOTO, J. J. M. Impactos sociais, econômicos e ambientais da melhoria no saneamento básico rural no Brasil. In: IX Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, Brasília, 2011.
- SILVA, N. B. Avaliação do uso de diferentes agentes desinfetantes em esgoto sanitário tratado campinas. *Diogenes*, 2018.
- RESENDE, R. G.; FERREIRA, S.; FERNANDES, L. F. R. O saneamento rural no contexto brasileiro. *Revista Agrogeoambiental*, v. 10, n. 1, p. 131–149, 2018.
- SCOPACASA, V. A. Introdução à Tecnologia de LED. *La_Pro*, p. 5–11, 2004.
- SANTOS, T. S. DOS *et al.* Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 20, n. 4, p.

595–602, 2015.

MALIK, S. A. *et al.* Effects of Ultraviolet Light-Emitting Diodes (UVA-Leds) Irradiation on *Escherichia Coli* for Inactivation of Microorganisms. *International Medical Device and Technology Conference*, n. September, p. 207–210, 2017.

OGUMA, K. UV LEDs for Water Treatment : Research Overview and Perspectives. v. 20, n. 1, p. 2017–2019, 2017.

OLIVEIRA, THAÍSSA JUCÁ JARDIM. Fossa Séptica Biodigestora: limitações e potencialidade de sua aplicação para o tratamento de águas fecais em comunidades rurais. 2018.

SANTOS, GRAZIELLE ROCHA DOS. Técnica de reconhecimento de padrões para a avaliação de corpos hídricos afetados por rejeitos do rompimento da Barragem de Fundão. 2018.

BRASIL. Lei no 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. Brasília. 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. FUNASA. O desafio de universalizar o Saneamento Rural. p. 12, 2011. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wpcontent/files_mf/blt_san_rural.pdf

HESPANHOL, I. Água e saneamento básico. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). Águas doces no Brasil. Capital ecológico, uso e conservação. 3 ed. São Paulo: Escrituras, 2006.

FIGUEIREDO, I. C. S. et al. Fossa Séptica Biodigestora: avaliação crítica da eficiência da tecnologia, da necessidade da adição de esterco e dos potenciais riscos à saúde pública. *Revista DAE*, v. 67, n. 220, p. 100–114, 2019.

LANNA, M, C, S. Esgotamento Sanitário Descentralizado. Miguel Burnier – MG. Relatório de resultados do projeto Lar Doce Água. 2018.

VON SPERLING, M. Princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 1996.

SILVA, W. T. L. Tecnologias de saneamento Básico Rural desenvolvidas na Embrapa. Belo Horizonte: [s.n.], 2013.

TONETTI, A. L.; BRASIL, A.L.; MADRID, F.J.P.L.; FIGUEIREDO, I.C.S.; SCHNEIDER, J.; CRUZ, L.M.O.; DUARTE, N.C.; FERNANDES, P.M.; COASACA, R.L.; GARCIA, R.S.; MAGALHÃES, T.M. Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções. Biblioteca/Unicamp. Campinas, São Paulo, 153p, 2018

MADRID, Francisco José Peña y Lillo. Aplicação da vermifiltração no tratamento de esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 131p. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas.

SARTORI, Marcia Aparecida. Desempenho de vermifiltros no tratamento de esgoto doméstico em pequenas comunidades. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). 75p. Universidade Federal de Viçosa. 2010

SINHA, R.K.; BHARAMBE G.; CHAUDHARI, U. Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *Environmentalist*, n. 28, p. 409-420. 2008

SOTO, M.A.; TOHÁ, J. Ecological Wastewater Treatment.: Advanced Wastewater Treatment. Recycling and Reuse. *AWT* 98, Milano, Italia 14:16, p. 1091-1094, September. 1998

XING, M.; LI, X.; YANG, J. Treatment performance of small-scale vermifilter for domestic wastewater and its relationship to earthworm growth, reproduction and enzymatic activity. *African Journal of Biotechnology*. DOI 10.5897/AJB10.811. 2010.

KOLLER,L.R.(1952). Ultraviolet radiation. Londres, John Wiley & Sons. 220p.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1, 4ª ed., p. 452. Belo Horizonte, Editora UFMG. 2014

CAMPOS, J.R.; PIZZIRANI, J.A.(1977). Desinfecção com radiação ultravioleta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 9., Belo Horizonte. 17p.

KOLLER,L.R.(1952). Ultraviolet radiation. Londres, John Wiley & Sons. 220p.

SOUZA, J.B.(2000). Desinfecção de águas com cor e turbidez elevadas: comparação técnica de processos alternativos ao cloro empregando radiação ultravioleta e ácido peracético. São Carlos, 147p. Dissertação (Mestrado:Hidráulica e Saneamento)- Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

DANIEL, L.A.(1993). Desinfecção de esgoto com radiação ultravioleta: fotorreativação e obtenção de parâmetros cinéticos. São Carlos, 164p. Tese(Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NUVOLARI, A. Esgotos sanitários: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. São Paulo: FATEC/Edgar Bluches, 2003.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional

do

Meio

Ambiente-CONAMA.

LAWS, J.E.A. Evaluación ambiental del sistema Tohá en la remoción de Salmonella em aguas servidas domésticas. 2003. 92 p. Tesis (Magister en Gestión y Planificación Ambiental) – Universidad de Chile, Santiago.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 243 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, 1).

DELIBERAÇÃO NORMATIVA CONJUNTA COPAM-CERH/MG Nº 8, DE 21 DE NOVEMBRO DE 2022.

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS (PDRH) DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. 2012.

COSTA, A. B. Tecnologia Social políticas públicas. Brasília: Instituto Pólis. 2013.

ROTHMUND, KATIÚSCIA. Avaliação da viabilidade e proposta de tratamento de efluente doméstico em universidades através de um vermifiltro com minhocas da espécie eisenia andrei

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DA LÂMPADA UTILIZADA



E27 Lâmpada Uv 60w
254nm Led Uvc Bulbo Luz
Interior

R\$ 154³²

Especificação:

Material: liga de alumínio + plástico.

Potência: 60w.

Tensão: AC 100-277V.

Comprimento de onda: 254nm.

Tamanho da aparência: 50x50x185mm.

Interface de instalação: e27.

Cor: Mostrar como imagem.