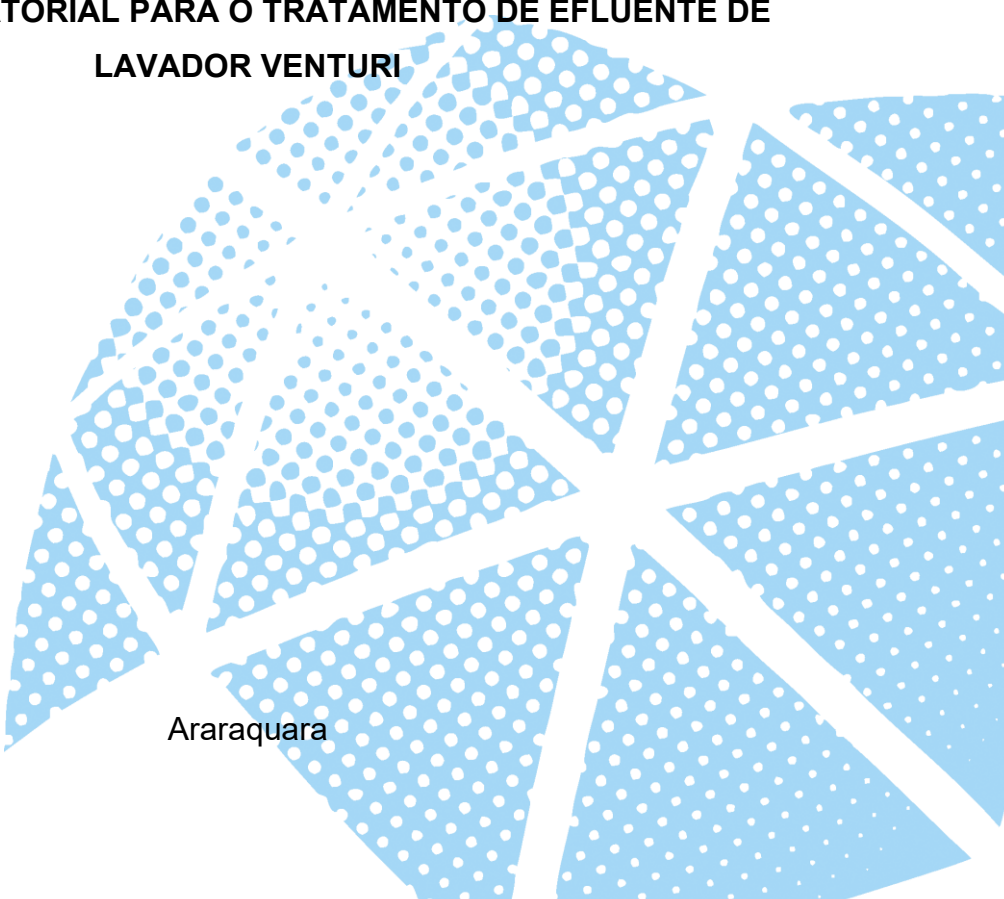


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

MATHEUS OLIVEIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA COLUNA FILTRANTE EM
ESCALA LABORATORIAL PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE DE
LAVADOR VENTURI**

Araraquara



2026

MATHEUS OLIVEIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA COLUNA FILTRANTE EM
ESCALA LABORATORIAL PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE DE
LAVADOR VENTURI**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Química,
Araraquara, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Arnaldo Sarti

Araraquara

2026

S586d

Silva, Matheus Oliveira

Desenvolvimento e avaliação de uma coluna filtrante em escala laboratorial para o tratamento de efluente de lavador Venturi /

Matheus Oliveira Silva. -- Araraquara, 2026

47 f.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara

Orientador: Arnaldo Sarti

1. Lavador Venturi. 2. Água Reuso. 3. Águas residuais Purificação. 4. Filtros e filtração. I. Título.

MATHEUS OLIVEIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA COLUNA FILTRANTE EM
ESCALA LABORATORIAL PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE DE
LAVADOR VENTURI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Instituto de Química, Araraquara, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Data da defesa: 29/06/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arnaldo Sarti

Ma. Karolina Sanches Yaekashi

Prof. Dr. Lorena Oliveira Pires

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família — meus pais, Vanessa e Marcos, e meu irmão, Lucas. Por todo o amor, compreensão, dedicação e perseverança, que me proporcionaram os recursos necessários para alcançar meus objetivos.

Agradeço também aos amigos que me acompanharam ao longo desta jornada, oferecendo apoio e alegria, desde as amizades do ensino médio até aquelas conquistadas durante a graduação.

Ao meu orientador, Arnaldo, agradeço a oportunidade e os recursos para a execução deste trabalho, o que me permitiu desenvolver e aperfeiçoar os conhecimentos adquiridos na graduação. Além disso, agradeço por todos os ensinamentos compartilhados em suas disciplinas, que foram essenciais para a minha formação e que aplico até hoje no meu trabalho.

Agradeço também o apoio de Brenda Gomes e Bruna Mello, que me apoiaram na execução deste trabalho, auxiliando-me nos procedimentos experimentais.

Aos membros da banca examinadora, Lorena e Karolina, como titulares, e aos professores Elias e Nakamura, como suplentes, agradeço por aceitarem o convite de fazer parte da defesa deste trabalho. Assim como ao professor Arnaldo, agradeço pelos conhecimentos técnicos e teóricos compartilhados comigo durante as aulas.

Por fim, agradeço à UNESP, por disponibilizar a infraestrutura necessária para a minha graduação, e a todos os professores que me permitiram desenvolver habilidades fundamentais, tanto na minha vida profissional quanto na vida pessoal.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de uma coluna filtrante em escala laboratorial destinada ao tratamento do efluente líquido gerado por um lavador de gases do tipo Venturi, operando em um sistema piloto de combustão de biomassa. O filtro foi desenvolvido de forma que o fluxo de efluente seja descendente, e o meio filtrante foi estruturado em três camadas sobrepostas: pedregulho para a distribuição de fluxo, areia para a filtração mecânica principal e resina mista de troca iônica para o polimento final do efluente. Os ensaios experimentais demonstraram elevada eficiência do sistema sob diferentes vazões operacionais, alcançando a remoção integral (100%) dos sólidos suspensos totais e uma redução média de 95% na turbidez da água. Adicionalmente, o processo proporcionou uma eficiência superior a 90% na retenção de condutividade elétrica e de íons específicos, tais como cálcio, magnésio, potássio e sulfato, gerando um efluente final de aspecto visualmente límpido e com pureza iônica superior à água da rede pública de abastecimento em múltiplos parâmetros minerais. Diante dos resultados analíticos obtidos, constatou-se que o efluente tratado atendeu satisfatoriamente aos critérios da Classe 3 estabelecidos pelo SINDUSCON-SP. Desse modo, o sistema desenvolvido mostra-se viável e plenamente recomendado para fins de reuso não potável, especificamente na irrigação de áreas verdes e jardins.

Palavras-chave: lavador venturi; coluna filtrante; tratamento de efluentes; reuso de água.

ABSTRACT

This study presents the development and evaluation of a laboratory-scale filtration column designed to treat the liquid effluent generated by a Venturi scrubber operating in a pilot biomass combustion system. The filter medium was structured in an upflow configuration consisting of three overlapping layers: gravel for flow distribution, sand for main mechanical filtration, and a mixed ion-exchange resin for the final polishing of the effluent. Experimental tests demonstrated high system efficiency under different operational flow rates, achieving the full removal (100%) of total suspended solids and an average reduction of 95% in water turbidity. Additionally, the process provided an efficiency superior to 90% in the retention of electrical conductivity and specific ions, such as calcium, magnesium, potassium, and sulfate, generating a final effluent that is visually clear and possesses higher ionic purity than tap water across multiple mineral parameters. In light of the analytical results obtained, the treated effluent satisfactorily met the Class 3 criteria established by SINDUSCON-SP. Therefore, the developed system proves to be viable and fully recommended for non-potable reuse purposes, specifically for the irrigation of green areas and gardens.

Keywords: venturi scrubber; filtration column; wastewater treatment; water reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Exemplo demonstrativo da distinção da taxa de filtração, para uma filtração rápida e uma filtração lenta	19
Figura 2 –	Tipos de sentido de fluxos da filtração	21
Figura 3 –	Grãos com tamanho e formato distintos	23
Figura 4 –	Diagrama do queimador de biomassa	25
Figura 5 –	Vista da coluna filtrante	27
Figura 6 –	Esquema de montagem do ensaio de filtração	28
Figura 7 –	Vista do conjunto membrana e cadinho	30
Figura 8 –	Sistema de filtração com bomba de vácuo	30
Figura 9 –	Vista da membrana após o processo de filtração e secagem	31
Figura 10 –	Comparação visual das amostras de água pré e pós-tratamento em diferentes condições de operação do lavador Venturi: A) Água bruta (300 L/h); B) Água bruta (400 L/h); C) Água bruta (500 L/h); D) Água tratada (300 L/h); E) Água tratada (400 L/h); F) Água tratada (500 L/h)	32
Figura 11 –	Comparação da membrana pós filtração das amostras de água	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros limitantes para aplicação dos métodos de filtragem	20
Tabela 2 –	Propriedades de alguns meios filtrantes	24
Tabela 3 –	Valores obtidos da análise das amostras de água bruta	33
Tabela 4 –	Valores obtidos da análise das amostras de água tratada	34
Tabela 5 –	Eficiência de remoção de turbidez em diferentes vazões operacionais	35
Tabela 6 –	Comparação da Condutividade entre o efluente bruto e o filtrado em função da variação da vazão	36
Tabela 7 –	Eficiência de remoção de alguns íons em diferentes vazões	36
Tabela 8 –	Comparação de concentração antes e após a filtração	37
Tabela 9 –	Comparação dos resultados obtido com os critérios para água de reuso	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
EESC-USP	Escola de Engenharia de São Carlos
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MMA	Ministério do Meio Ambiente
SINDUSCON-SP	Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1OBJETIVO GERAL.....	12
2.2OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 TRATAMETO DE ÁGUA	13
3.2 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA.....	14
3.2.1 Características Físicas	14
3.2.1.1 <i>Sólidos</i>	14
3.2.1.2 <i>Turbidez</i>	15
3.2.1.3 <i>Cor</i>	16
3.2.1.4 <i>Odor</i>	16
3.2.1.5 <i>Temperatura</i>	17
3.2.1.6 <i>Condutividade</i>	17
3.2.2 Características Químicas	17
3.2.2.1 <i>pH</i>	18
3.2.2.2 <i>Acidez e Alcalinidade</i>	18
3.2.2.3 <i>Dureza</i>	18
3.2.2.4 <i>Oxigênio Dissolvido</i>	19
3.3FILTRAÇÃO	19
3.3.1 Tipos de Filtração	20
3.3.2 Características do leito filtrante	21
3.3.2.1 <i>Tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade</i>	22
3.3.2.2 <i>Coeficiente de esfericidade e porosidade</i>	23
3.3.2.3 <i>Espessura do leito</i>	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 AMOSTRA DO EFLUENTE.....	26

4.2 FILTRO EXPERIMENTAL	27
4.2.1 Construção da coluna filtrante	27
4.2.1.1 <i>Desenvolvimento do leito</i>	27
4.2.2 Aparato experimental	28
4.2.3 Configuração da bomba	29
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA	30
4.3.1 Determinação de sólidos suspensos	31
4.3.1.1 <i>Preparação membrana</i>	31
4.3.1.2 <i>Determinação de sólidos suspensos totais, fixos e voláteis</i>	32
5 RESULTADOS	34
5.1 PROCESSO DE FILTRAÇÃO	34
5.2 ANÁLISES FÍSICOS-QUÍMICAS	35
5.3 EFICIÊNCIA DA COLUNA	37
5.4 CAPACIDADE DE REUSO	39
6 CONCLUSÃO	42

1 INTRODUÇÃO

A aplicação da biomassa como combustível para geração de energia em ambientes industriais cresce no Brasil e no mundo. Na indústria principalmente naquela em que há grande quantidade de resíduos orgânicos, como bagaço de cana, cavacos de madeira, cascas de cereais e resíduos agrícolas, a conversão dessa biomassa por meio de sistemas de caldeiras e cogeração de energia desempenha um papel fundamental na matriz energética industrial [1]. No Brasil, no ano de 2023, a biomassa correspondia a cerca de 8,55% da matriz energética do país [2]; contudo, as fontes de energia térmica utilizadas pela indústria, a biomassa corresponde a 22%, sendo a segunda maior fonte do país [3].

Entretanto, apesar de a biomassa ser considerada mais sustentável do que os combustíveis fósseis, o seu processo de queima emite grandes quantidades de gases poluentes e material particulado na atmosfera [4]. Em ambientes industriais, a emissão de poluentes é controlada por meio de equipamentos como ciclones, filtros, precipitadores e lavadores de gases. Um dos equipamentos de maior eficiência e mais utilizados são os lavadores do tipo Venturi. Tal sistema possui alta eficácia na remoção de partículas de uma ampla faixa de tamanho (dimensão) utilizando um líquido de lavagem (normalmente a água). Apesar de ser bastante efetiva, uma desvantagem desse equipamento é a geração de um efluente líquido que deve ser tratado posteriormente [5, 6].

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo estudar e desenvolver um método de tratamento para o efluente líquido a base de água gerada por um lavador Venturi operando em um sistema de combustão de biomassa. Escolheu-se o tratamento por via do processo de filtração, por ser o método mais tradicional no tratamento de água. Ao longo do estudo, desenvolveu-se experimentalmente uma coluna filtrante para realizar o tratamento desse efluente. Por fim, analisaram-se laboratorialmente as amostras do efluente do Venturi e após filtração (filtrado) para verificar a eficiência do filtro desenvolvido e a avaliar se as características do efluente filtrado podem ser classificadas como água adequada para reuso.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar o tratamento do efluente líquido proveniente de um lavador Venturi, utilizando uma coluna filtrante desenvolvida em escala laboratorial. O foco principal é verificar a capacidade do sistema em remover impurezas e preparar a água para possíveis usos secundários (reuso).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma coluna filtrante em escala laboratorial utilizando diferentes camadas de materiais filtrantes;
- Realizar ensaios para medir a eficiência do sistema na remoção de sólidos suspensos e redução da turbidez;
- Analisar o desempenho do tratamento por meio da comparação físico-química das amostras antes e depois da filtração;
- Avaliar a viabilidade de reuso do efluente final, confrontando os resultados com as normas de qualidade do SINDUSCON-SP, além de comparar com os resultados das análises de água da rede pública de abastecimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

A água é um recurso essencial para os setores urbano, rural e industrial. Por ser um recurso finito e de acesso limitado em diversas regiões, a implementação de processos de tratamento, reuso e a manutenção dos recursos hídricos torna-se um processo de extrema importância para a atividade humana.

O reaproveitamento de águas residuais para atividades agrícolas remonta desde o período da antiguidade; em diversas civilizações antigas, como a chinesa, indiana e grega, há evidências históricas do uso de matérias granulares ou tecido como filtro para clarificar a água [7]. Entretanto, ao longo da história, o descarte ou reaproveitamento de águas residuais eram feitos de forma precária e inadequada; a falta de infraestrutura e conhecimento tornavam epidemias e surtos de doenças algo constante na sociedade. Com o grande crescimento dos centros urbanos e da industrialização, houve o agravamento nas epidemias e outros problemas sanitários, assim novos métodos e técnicas de tratamento de água eram cada vez mais necessários. Mas foi só no século XIX que começou a haver um desenvolvimento significativo no tema.

Já no início do século XIX, na Inglaterra, filtros compostos por um leito de areia começaram a ser utilizados para fazer a filtração lenta da água, para torná-la potável. Entretanto foi apenas após grandes surtos de doenças na primeira metade do século que a filtração da água na captação dos rios se tornou obrigatória na Inglaterra. Nos EUA, diversos programas governamentais de reuso planejado de águas residuais começaram a surgir na primeira metade do século XX; vários estados norte-americanos incentivavam o seu uso para fins agrícolas e industriais [8, 9].

Na segunda metade do século XX, a União Europeia e a maioria dos estados americanos reconheceram a importância do reuso da água residual tratada como forma de preservação das fontes naturais de água. Nas décadas seguintes, vários países criaram legislações referentes à preservação e manutenção de corpos d'água, e normas sobre o tratamento, reutilização e descarte da água [8].

No Brasil, a primeira legislação relacionada ao tema vem a surgir em 1934, com o Código de Águas; essa legislação estabeleceu o domínio dos rios entre federal, estados e municípios, além de estabelecer regras para o uso da água para diferentes atividades, como agrícola, urbana e de geração de energia [10]. Novas legislações só vieram a surgir após a Constituição de 1988; na própria Constituição, estabeleceu-se a dominialidade da água, passando a ser um bem público, dos estados e da União.

Um marco importante foi a criação da Lei nº 9.433, na qual se estabeleceram mecanismos de controle e incentivo ao uso racional de água; por meio desta lei, foram criados a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Além disso, diversas instituições surgiram com base nesta lei, com o objetivo de implementar essas medidas; algumas dessas instituições foram o Ministério do Meio Ambiente (MMA), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Agência Nacional de Águas (ANA) [10, 11].

Em 2005, o Conselho Nacional do Meio Ambiente criou a Resolução nº 357, na qual estabeleceu parâmetros relacionados às propriedades da água; nesta resolução, foram classificados os corpos d'água em algumas classes e, para cada classe, foi definida uma finalidade e tratamento, caso potável. Além desta classificação, esta resolução trouxe um padrão de qualidade de água para cada classe de água.

3.2 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA

Uma amostra de água residual ou de um corpo d'água podem apresentar diversas propriedades e características, que devem ser levadas em consideração para escolha adequada de tratamento. Essas características podem ser classificadas em características físicas, químicas, biológicas e alguns casos radiológicas.

3.2.1 Características Físicas

Dentre das características físicas que a água pode apresentar, as principais são sólidos, turbidez, cor, odor, temperatura e condutividade.

3.2.1.1 Sólidos

Os sólidos consistem em toda a matéria residual de uma amostra de água após esta ser submetida a processos de filtração, evaporação, secagem ou calcinação. Para cada processo, a fração resultante é definida em uma classificação (totais, suspensos, dissolvidos ou sedimentáveis), podendo ainda ser ramificada em sólidos fixos ou voláteis. Tradicionalmente eles são representados como uma unidade de massa em relação ao volume, como por exemplo mg/L.

- Sólidos Totais (ST): Definem-se como a matéria resultante da evaporação da amostra seguida de secagem em estufa sob temperatura de 103 a 105 °C.
- Sólidos Suspensos (SS): Compreendem toda a matéria passível de retenção em um filtro; o tamanho dessas partículas varia, geralmente, de 1 a 100 μm .
- Sólidos Dissolvidos (SD): É o material sólido que não é retido em filtro de 1 μm ; o tamanho de suas partículas é estimado entre 10^{-3} e 10^{-5} μm . Caso o tamanho esteja entre 1 e 10^{-3} μm , são denominados Sólidos Coloidais.
- Sólidos Sedimentáveis: Fração de sólidos que sedimenta sob o efeito da gravidade após um período determinado.

Ao submeter o material sólido residual à calcinação em temperaturas de 550 a 600 °C, a fração orgânica é volatilizada, restando apenas a fração inorgânica. Nesse contexto, denomina-se o material evaporado como Sólidos Voláteis (SV) e o material residual como Sólidos Fixos (SF).

A remoção de sólidos em águas residuárias é influenciada principalmente pelo tamanho das partículas. Assim, sólidos suspensos (maiores que 1 μm) são removidos com maior facilidade em comparação aos sólidos coloidais e dissolvidos. Os sólidos suspensos podem ser removidos por sedimentação simples, enquanto os coloidais, devido ao menor tamanho, exigem etapas de coagulação e floculação prévias à sedimentação para facilitar a decantação. Já a remoção de sólidos dissolvidos requer métodos de tratamento mais complexos, como adsorção, troca iônica ou osmose reversa [12, 13].

3.2.1.2 Turbidez

A presença de sólidos suspensos na água acaba ocasionando o aumento da turbidez da água; essas partículas suspensas podem ser tanto materiais inorgânicos, como areia e argila, quanto materiais orgânicos, como algas, plâncton e outros microrganismos. A turbidez é expressa em unidades nefelométricas de turbidez (NTU) e pode ser determinada por meio de um turbidímetro.

Assim como dito no tratamento de sólidos, esse material pode ser removido por via da sedimentação simples posterior a uma etapa de flotação por ar dissolvido, a qual auxilia na remoção das partículas menores; em alguns casos, para melhor eficiência de remoção, o processo é complementado com uma etapa de filtração no final. Vale ressaltar que, para casos de águas residuais pouco turvas, o processo de filtração pode ser utilizado sem etapas prévias [13].

3.2.1.3 Cor

A cor da água é influenciada pela presença de materiais orgânicos e inorgânicos no meio; os compostos orgânicos são normalmente aqueles gerados da decomposição de plantas e animais, como os ácidos húmico e fúlvico, e os compostos inorgânicos são principalmente óxidos normalmente encontrados no solo, como óxido de ferro e óxido de manganês. A cor também é influenciada pelo pH, pois ele acaba interferindo no equilíbrio químico desses materiais orgânicos e inorgânicos [13].

Para uma melhor diferenciação entre cor e turbidez, a cor é definida de duas formas: a cor aparente (com interferência da turbidez) e a cor verdadeira (sem interferência). A cor aparente é aquela medida sem a remoção de sólidos suspensos, enquanto a cor verdadeira é determinada após a remoção das partículas suspensas por meio da filtração ou centrifugação [14].

A unidade mais comum para expressar a cor da água é a unidades de cor (uC) ou unidades Hazen (uH), correspondentes à escala platina-cobalto (Pt-Co). Essa propriedade é mensurada analiticamente por meio de um espectrofotômetro ou de um colorímetro, que devem ser operados em comprimentos de onda específicos.

3.2.1.4 Odor

As principais fontes de odor são geralmente compostos gerados na decomposição de matéria orgânica ou compostos excretados por algumas espécies de algas; outra fonte de odor é ocasionada pelos clorofenóis. Esses compostos são gerados pela reação do cloro livre da água com os fenóis; esses produtos gerados apresentam um forte odor característico [13].

A remoção de odor é realizada por meio da aeração e, em seguida, pela adsorção utilizando carvão ativado; em alguns casos, o processo é complementado empregando algum oxidante, como o cloro e o peróxido de hidrogênio [14].

3.2.1.5 Temperatura

A temperatura é um parâmetro extremamente importante, principalmente tratando-se de ecossistemas aquáticos; a variação de temperatura pode tanto alterar a atividade química do meio quanto alterar a solubilidade de alguns gases na água, sendo o principal deles o gás oxigênio, que é fundamental para a vida aquática.

Outro ponto importante é que a temperatura pode influenciar o desempenho das etapas de tratamento da água e a eficiência de desinfecção [12, 14].

A temperatura pode ser expressa por diferentes unidades de medida, a depender da aplicação ou da região geográfica. As unidades mais comuns são o grau Celsius (°C), o grau Fahrenheit (°F) e o Kelvin (K), e a medição é realizada por meio de termômetros ou termopares.

3.2.1.6 Condutividade

A condutividade da água é devida à presença de íons de sais dissolvidos no meio; essa propriedade pode ser utilizada para estimar a quantidade de sólidos totais dissolvidos na água, devido à proporcionalidade da quantidade de sólidos com a condutividade [14]. "A quantificação da condutividade elétrica é realizada utilizando um condutivímetro, com resultados expressos em microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$). É importante ressaltar que a temperatura da amostra exerce ampla influência nos valores obtidos, visto que a mobilidade iônica varia em função dessa variável; por conseguinte, as leituras são rotineiramente referenciadas à temperatura padrão de 25 °C.

3.2.2 Características Químicas

O conhecimento da presença de compostos químicos na água residual é de extrema importância, principalmente para a escolha adequada do tratamento, visto que certos compostos só podem ser removidos efetivamente utilizando técnicas e tecnologias mais complexas e menos tradicionais.

As características químicas principais são o pH, a acidez, a alcalinidade, a dureza e o oxigênio dissolvido; além do mais, para a avaliação do nível de poluição de um determinado corpo de água, a realização de análises de determinação de íons metálicos e compostos inorgânicos também é comum [14].

3.2.2.1 pH

O pH é uma propriedade adimensional no qual pode ser determinada utilizando um pHmetro, os valores obtidos se encontram numa escala entre 0 a 14. O pH tem um papel fundamental no tratamento de água; em diversas técnicas e métodos de tratamento, o controle de pH é essencial para garantir uma eficiência maior no processo. Alguns exemplos são:

- Coagulação e floculação ocorrem sob uma faixa de pH ótimo, na qual as partículas coloidais apresentam uma carga superficial menor, facilitando assim a floculação;
- Durante a desinfecção utilizando cloro, o processo se torna mais eficiente em pHs mais ácidos, devido à menor dissociação do ácido hipocloroso em hipoclorito;
- O controle do pH pode ser utilizado para sedimentar íons de metais pesados, os quais têm a tendência maior de precipitar em pHs mais elevados.

Além da influência no tratamento, o pH afeta também tanto o armazenamento quanto o transporte da água; estruturas metálicas ou feitas de concreto em contato com a água podem sofrer o processo de corrosão em meios mais ácidos, enquanto em meios básicos ocorre o processo de incrustação na infraestrutura. Isto se deve à influência do pH no equilíbrio químico do carbonato presente na água [13, 14].

3.2.2.2 Acidez e Alcalinidade

Essas propriedades podem ser definidas como a capacidade da água de reagir e neutralizar bases (definida como acidez) ou ácidos (definida como alcalinidade).

Ambas as características sofrem influência do equilíbrio químico do gás carbônico na água. O gás carbônico, ao se dissociar em água, gera o ácido carbônico, um ácido fraco; portanto, o próprio gás carbônico é considerado uma fonte de acidez. Já os carbonatos, hidróxidos e bicarbonatos, ao serem solubilizados em água, reagem com esse gás carbônico, assim o “capturando”. Isso altera o equilíbrio químico do gás carbônico, diminuindo a geração de ácido carbônico, o que, por consequência, aumenta o pH do meio [13, 14].

3.2.2.3 Dureza

A dificuldade de dissolução de sabão e detergente, juntamente com o agravamento de incrustação, está relacionada com a dureza da água; essa característica é ocasionada pela presença de sais de alguns íons metálicos, sendo os mais comuns: sais de cálcio, sulfatos de magnésio, nitratos de ferro e nitrato de manganês.

A dureza pode ser classificada em dureza temporária, dureza permanente e, por fim, a dureza total, que é a soma das duas anteriores. A temporária é normalmente causada por carbonatos e bicarbonatos, e tem essa nomenclatura devido ao fato de ser facilmente removida por meio do aumento de temperatura ou do pH da água. Enquanto isso, a dureza permanente é causada por hidróxidos, sulfatos, cloretos e nitratos; neste caso, devem ser utilizados outros métodos como a precipitação química ou troca iônica para sua remoção. [14, 15].

3.2.2.4 Oxigênio Dissolvido

O oxigênio presente na água cumpre um papel fundamental na manutenção dos ecossistemas aquáticos. Em ambientes aquáticos com uma baixa concentração de oxigênio — algumas literaturas consideram valores abaixo de 2 mg/L — a vida aquática se torna mais difícil; a presença de peixes e outros seres vivos aeróbicos se torna inviável nessas situações [16].

A presença de oxigênio na água é influenciada principalmente pela temperatura, a qual tem impacto na solubilidade do gás oxigênio, e pela presença de microrganismos que fazem a decomposição de matéria orgânica, pois no processo há o consumo de oxigênio do meio; além disso, outros parâmetros influenciadores são a salinidade, a pressão do gás na atmosfera e os sólidos suspensos [12, 16].

3.3 FILTRAÇÃO

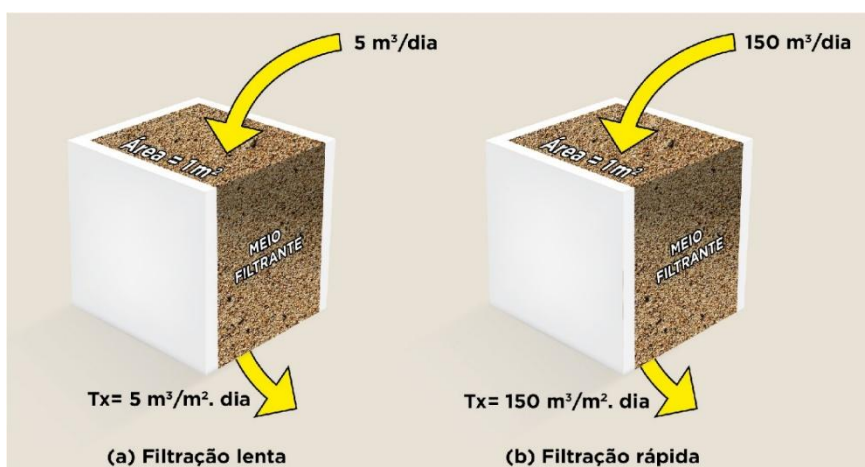
A filtração é uma das operações unitárias mais antigas e tradicionais no tratamento de água, sendo que esse processo desempenha um papel fundamental na cadeia de tratamento urbana e industrial. Na filtração, a remoção de impurezas ocorre por meio da passagem do efluente através de um meio poroso, o qual retém, mecânica ou quimicamente, as partículas. Logo, essa operação unitária pode ser considerada um processo físico-químico; em alguns casos, como em filtros lentos, também há a presença de um processo biológico que auxilia na remoção de contaminantes [9].

3.3.1 Tipos de Filtração

Nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) e nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), a filtração ocorre tradicionalmente após as etapas de coagulação e floculação, sendo este tipo de operação denominado filtração direta. Entretanto, em alguns casos, dependendo das características do efluente, não é necessária a implementação de etapas anteriores de coagulação e floculação, sendo a filtração uma etapa única no tratamento; esse método é chamado de filtração lenta, que possuem este nome por sua operação ocorrer com baixas taxas de filtração.

Além disso, o processo de filtração é classificado de acordo com a sua taxa de filtração: filtros rápidos são aqueles que operam com altas taxas, que variam de 80 a 600 m^3/m^2 por dia, enquanto os filtros lentos possuem taxas bem menores, em torno de 2 a 8 m^3/m^2 por dia [17]. Um fator importante de se conhecer a taxa de filtração é o auxílio no dimensionamento e na definição do método de lavagem do filtro; em filtros rápidos, a lavagem é realizada rapidamente e com uma alta frequência por meio de um fluxo em contracorrente, enquanto nos filtros lentos a lavagem é realizada manualmente e em períodos mais longos, possuindo, em contrapartida, uma frequência de lavagem bem menor do que a dos filtros rápidos [9].

Figura 1 – Exemplo demonstrativo da distinção da taxa de filtração, para uma filtração rápida e uma filtração lenta.



Fonte: Scalize ([s.d.]).

Historicamente, a filtração lenta com leitos de areia foi o primeiro método a ser implementado no tratamento de águas residuais. Suas principais vantagens são a fácil operação e a baixa complexidade de construção. Além disso, apresenta uma remoção eficiente de microrganismos transmissores de doenças. No entanto, ao longo do tempo, os métodos de filtração lenta foram substituídos pela filtração direta, em consequência da maior capacidade de tratamento em um menor espaço físico, além de proporcionar taxas de filtração superiores.

Outro fator relevante é a qualidade do efluente a ser filtrado. A filtração lenta apresenta mais limitações do que a direta, sendo recomendado seu uso apenas para efluentes com baixa turbidez e cor [18, 19], os parâmetros de qualidade da água recomendado para o uso de cada técnica estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros limitantes para aplicação dos métodos de filtragem

Parâmetro	Unidade	Filtragem Direta		Filtragem Lenta
		Ascendente	Descendente	
Turbidez	uT	≤ 50	≤100	≤ 10
Cor verdadeira	uH	≤ 50	≤50	≤ 10
Concentração de algas	UPA/mL	≤ 500	≤ 1000	≤ 500
<i>Escherichia coli</i>	NPM/100 mL	≤ 1000	≤ 500	≤ 500
Coliformes totais	NPM/100 mL	≤ 1000	≤ 2500	≤ 1000

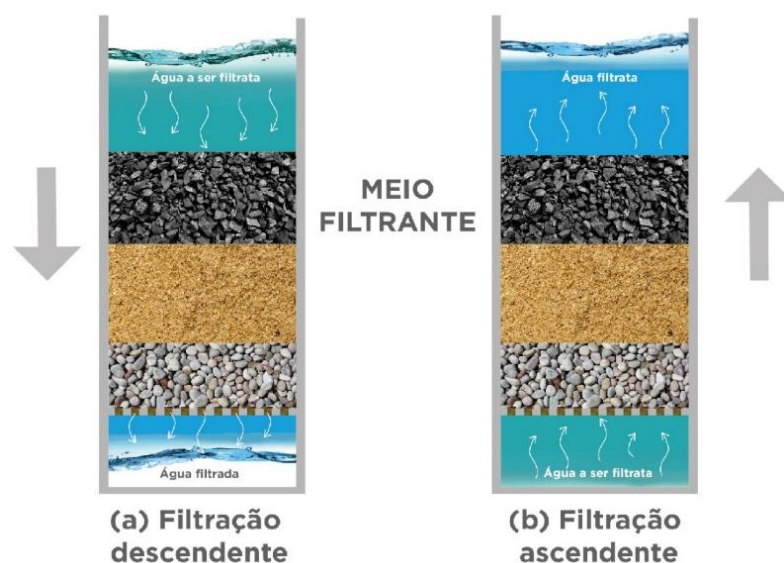
Fonte: Adaptado de Cornélio (2021).

3.3.2 Características do leito filtrante

O leito filtrante é o elemento mais importante no filtro, pois é ele o responsável por realizar o processo de filtração e purificação do efluente. Os leitos são constituídos de uma ou mais camadas de algum material granular, sendo os mais comuns a areia e o de carvão (antracito), em diversos casos é empregado uma camada de pedregulhos com função de ser uma camada suporte.

Tradicionalmente, o processo de filtração no meio filtrante ocorre no sentido da passagem do efluente pelas camadas mais finas (menor granulometria) para as camadas mais grossas (maior granulometria), método denominado filtração descendente. No entanto, em alguns casos, o sentido do fluxo do efluente é oposto, ou seja, das camadas mais grossas para as camadas mais finas, sendo chamado de filtração ascendente [19].

Figura 2 – Tipos de sentido de fluxos da filtração



Fonte: Scalize ([s.d.]).

No dimensionamento do meio filtrante, o conhecimento das propriedades granulométricas do material filtrante é essencial. As propriedades mais importantes são: o tamanho efetivo, o coeficiente de desuniformidade, o formato do grão (coeficiente de esfericidade) e a porosidade.

3.3.2.1 Tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade

A boa forma de expressar quantitativamente a granulometria de um material pelo parâmetro de tamanho efetivo (d_{10}), que pode ser determinado por meio de uma análise granulométrica. Conceitualmente, o tamanho efetivo é definido como o diâmetro da malha da peneira pela qual passam apenas 10% da massa seca total da amostra; ou seja, 90% da massa da amostra fica retida nessa malha [9].

O tamanho efetivo é utilizado também para calcular o coeficiente de desuniformidade (U ou C_d). Este parâmetro é calculado pela razão entre os diâmetros das malhas que dão passagem a 60% (d_{60}) e 10% (d_{10}) da massa seca total, respectivamente:

$$C_d = \frac{d_{60}}{d_{10}}(1)$$

O valor numérico igual a 1 deste coeficiente indica um material perfeitamente uniforme; conforme o valor progride para números maiores, indica materiais cada vez menos uniformes. A uniformidade do leito está relacionada principalmente à propriedade de penetrabilidade: leitos menos uniformes desfavorecem a penetração das partículas do efluente nas camadas internas [19].

De acordo com a norma ABNT NBR 12216 [20], o tamanho efetivo e o coeficiente de desuniformidade indicados no dimensionamento de filtros para abastecimento de água dependem da característica do filtro e do material, sendo que para:

- **Filtros lentos (camada simples):** camada constituída de areia, com valores de d_{10} entre 0,25 e 0,35 mm e C_d menor que 3;
- **Filtros rápidos (fluxo ascendente):** camada constituída de areia, com valores de d_{10} entre 0,7 e 0,8 mm e C_d menor que 2;
- **Filtros rápidos (fluxo descendente, camada simples):** camada constituída de areia, com valores de d_{10} entre 0,45 e 0,55 mm e C_d entre 1,4 e 1,6;
- **Filtros rápidos (fluxo descendente, camada dupla):** primeira camada constituída de areia, com valores de d_{10} entre 0,45 e 0,55 mm e C_d entre 1,4 e 1,6; e segunda camada constituída de antracito, com valores de d_{10} entre 0,8 e 1,0 mm e C_d inferior a 1,5.

3.3.2.2 Coeficiente de esfericidade e porosidade

As partículas de sólidos possuem diferentes formatos possíveis, desde os mais esféricos até os irregulares e pontiagudos. A característica do formato do grão tem grande influência nas propriedades do leito, afetando tanto a distribuição das partículas quanto a interação com o fluido.

Figura 3— Grãos com tamanho e formato distintos



Fonte: Mendes e Melo (2011).

O coeficiente de esfericidade (ψ) é uma medida normalmente utilizada para avaliar e representar o formato do grão. Nesse coeficiente, os valores encontram-se no intervalo de 0 a 1, sendo que 1 representa um formato perfeitamente esférico e valores próximos a 0 indicam formatos completamente irregulares.

Na construção do leito filtrante, a avaliação da esfericidade do material é importante para determinar a porosidade e o grau de empacotamento. Normalmente, considera-se que, quanto mais irregular for o formato da partícula, maior será a porosidade do leito.

Devido ao formato irregular e à disposição aleatória dos grãos durante o empacotamento, originam-se pequenos espaços vazios entre eles. Por serem espaços muito pequenos, esses vazios são responsáveis por "capturar" as partículas contaminantes da água durante a filtração. O parâmetro utilizado para representar a quantidade de espaços vazios é a porosidade (ϵ), definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total do meio. No dimensionamento de filtros, a perda de carga e a velocidade de lavagem são fatores diretamente relacionados a essa porosidade [18, 19].

Na Tabela 2, encontram-se os principais valores de coeficiente de esfericidade e porosidade de alguns materiais filtrantes.

Tabela 2 – Propriedades de alguns meios filtrantes

Material	Forma	Densidade [g/cm ³]	Coeficiente de esfericidade	Porosidade
Areia	Arredondada	2,65	0,82	0,42
Areia	Angular	2,65	0,73	0,53
Areia de Granada	-	3,1 a 4,3	-	-
Antracito	Angular	1,3 a 1,8	0,72	0,55
Pedregulho	Angular	2,65	2,65	0,38

Fonte: Adaptado de Richter (2009).

3.3.2.3 Espessura do leito

Um fato muito importante considerado no dimensionamento das espessuras das camadas é que a retenção e a remoção de impurezas ocorrem principalmente

nas camadas iniciais do filtro; considera-se que nos primeiros 30 cm do leito é onde ocorre predominantemente o processo de filtração.

Em filtros rápidos descendentes, recomenda-se que a espessura mínima seja entre 40 e 60 cm. Já para fluxos ascendentes, a espessura necessária é maior para evitar o trespasse; a norma NBR 12216 recomenda para esse tipo de filtro uma espessura mínima de 2,0 m. Enquanto isso, para filtros lentos de areia, a norma estabelece um valor mínimo de 0,90 m (90 cm) [20, 22].

O método de Kawamura também pode ser utilizado para determinar a espessura do leito. Este método estabelece recomendações de valores para a razão entre a profundidade do leito (L) e o tamanho efetivo (d_{10}): [9]

- Leito comum de areia (podendo conter antracito): $L/d_{10} = 1000$;
- Leito com camadas de areia, antracito e areia de granada: $L/d_{10} = 1250$;
- Leito de granulometria grossa (d_{10} entre 1,2 a 1,4 mm): $L/d_{10} = 1250$ a 1500;
- Leito de granulometria muito grossa (d_{10} acima de 1,5 mm): $L/d_{10} = 1500$ a 2000;

4 MATERIAIS E MÉTODOS

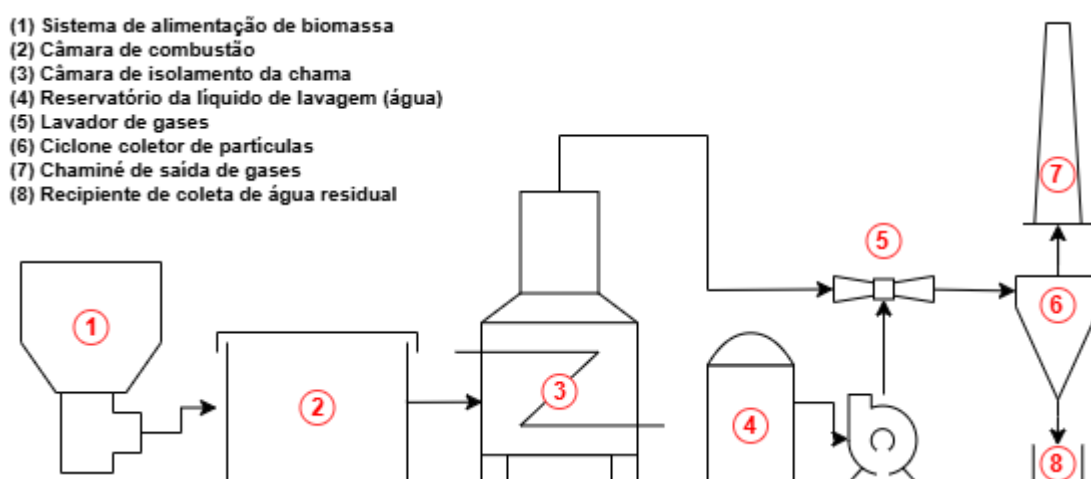
A execução deste trabalho foi estruturada em três etapas principais:

- Primeira etapa: consistiu na coleta e obtenção da amostra do efluente a ser estudado e submetido ao tratamento por filtração;
- Segunda etapa: compreendeu a construção do filtro e a montagem de todo o aparato experimental, finalizando com a realização dos ensaios de filtração do efluente;
- Terceira etapa: após a filtração, realizou-se a caracterização laboratorial, comparando as propriedades físico-químicas da amostra bruta com as da água filtrada.

4.1 AMOSTRA DO EFLUENTE

O efluente em estudo é a água residuária proveniente de um lavador Venturi, de um queimador de biomassa em escala piloto. O diagrama deste sistema pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama do queimador de biomassa



Fonte: Autoria própria (2025)

O processo inicia-se com a alimentação de bagaço de cana, transportado por meio de uma rosca sem-fim. Na câmara de combustão, ocorre a queima do material, otimizada pela injeção de ar externo via ventiladores. As cinzas resultantes desse

processo acumulam-se no fundo da câmara, enquanto os gases e o material particulado são direcionados a uma câmara de isolamento, onde são concentrados antes de seguirem para o sistema de lavagem.

O queimador piloto conta com um sistema de tratamento de gases composto por um lavador Venturi, um ciclone, uma chaminé de exaustão e um reservatório para coleta da água residual. No lavador, os gases e as partículas passam em alta velocidade por uma seção que possui quatro orifícios, responsáveis pela injeção de jatos de água atomizada. Essas gotículas capturam as partículas presentes no fluxo gasoso por impacto e interceptação.

Por fim, a mistura é enviada a um ciclone para a separação das fases gasosa e líquida. A fase gasosa é direcionada à chaminé para coleta de amostras e exaustão, enquanto a fase líquida, o efluente objeto deste estudo, é coletada e armazenada em um recipiente próprio.

Nas condições experimentais, foram configuradas cinco vazões distintas para a água injetada no lavador Venturi. Obteve-se, assim, uma amostra de efluente para cada um dos seguintes fluxos: 250, 300, 400, 450 e 500 L/h.

4.2 FILTRO EXPERIMENTAL

4.2.1 Construção da coluna filtrante

A confecção do filtro foi realizada em uma coluna de vidro com 137 cm de altura, diâmetro interno de 3,5 cm e massa de aproximadamente 1 kg. Vale ressaltar que a coluna utilizada no experimento, além das aberturas superior e inferior, possuía duas cavidades laterais. Como estas não tinham utilidade para o experimento, foram devidamente seladas.

4.2.1.1 Desenvolvimento do leito

O leito filtrante foi idealizado com três camadas sobrepostas de materiais com granulometrias distintas. Os materiais utilizados e suas respectivas posições foram:

- Camada superior: Pedregulho, com granulometria entre 25 e 30 mm;
- Camada mediana: Areia, com granulometria entre 0,5 e 1,5 mm;
- Camada inferior: Resina Mista (Purolite™ MB400), com granulometria entre 0,3 e 1,2 mm [24].

Cada camada foi dimensionada com 40 cm de altura, resultando em um leito total de 120 cm. Para dar suporte ao meio filtrante, instalou-se na abertura inferior da coluna um flange com uma malha de abertura reduzida, visando impedir a passagem da resina.

Figura 5– Vista da coluna filtrante



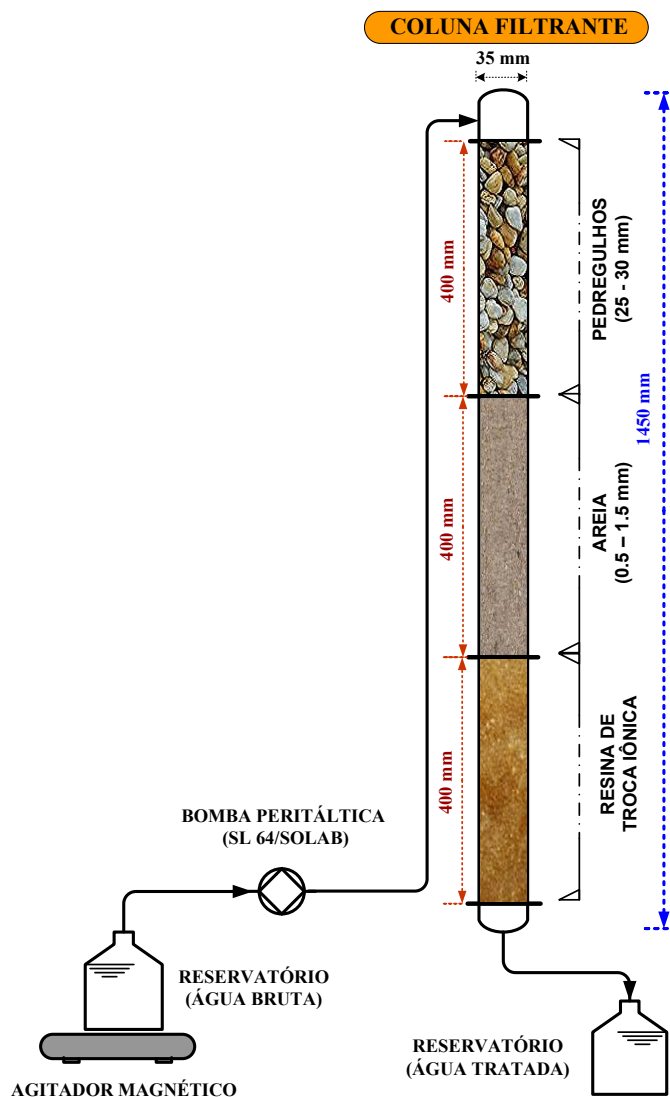
Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.2 Aparato experimental

O aparato experimental consiste na coluna filtrante desenvolvida anteriormente, uma bomba peristáltica (modelo SL 64/SOLAB) e dois reservatórios de água. No reservatório de água bruta, utilizou-se um agitador magnético para manter a homogeneidade da amostra e evitar a sedimentação de partículas sólidas no fundo do recipiente. Por fim, durante o processo experimental, as amostras de

água tratada foram coletadas após 10 minutos de filtração contínua. Um esquema desse aparato pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6– Esquema de montagem do ensaio de filtração



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.3 Configuração da bomba

A coluna foi idealizada para ter uma taxa de filtração de aproximadamente $14 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$, no qual é a taxa tradicionalmente utilizada em filtros de areia para abastecimento de água [9]. A partir dessa consideração, e dos dados dimensionais da coluna foi calculado a vazão de água necessária na operação da coluna.

Inicialmente foi calculado a área da transversal da coluna (A) por meio da Equação 2 utilizando o valor diâmetro da coluna (D), em seguida utilizando a

Equação 3, a vazão(Q) é obtida por meio do produto da taxa de filtração (tx) pela área da transversal da coluna (A). A vazão de alimentação obtida foi de 0,0135 m³/h, convertendo para mililitros por minuto, a vazão de alimentação é de 225 mL/min.

$$A[m^2] = \frac{\pi * D^2[m]}{4} \quad (2)$$

$$Q \left[\frac{m^3}{h} \right] = A[m^2] * tx \left[\frac{m^3}{m^2 h} \right] \quad (3)$$

Por fim, essa vazão de alimentação foi configurada numa bomba peristáltica (modelo SL 64/SOLAB) para alimentar o topo da coluna.

Os ensaios apresentaram duração total de 30 minutos, divididos em duas etapas de 15 minutos (equivalentes a três passagens cada). A primeira etapa consistiu na alimentação da coluna sem coleta de efluente, com o objetivo de estabilizar o processo de filtração em regime permanente. Na segunda etapa, realizou-se a amostragem contínua para a obtenção de uma amostra composta. Vale ressaltar que todos os experimentos foram conduzidos em ambiente climatizado sob temperatura controlada de (25 ± 3) °C.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA

Para a caracterização das amostras de água bruta e tratada foram realizadas análises laboratoriais das seguintes propriedades:

- pH: medição via pHmetro;
- Condutividade: determinada por meio de um condutivímetro;
- Turbidez: analisada em espectrofotômetro Macherey-Nagel modelo Nanocolor® Vis, configurado no comprimento de onda de $\lambda = 860$ nm;
- Sólidos suspensos: determinados pelo método gravimétrico.

Devido à indisponibilidade de reagentes específicos no laboratório, as amostras de água (bruta, tratada e uma amostra da rede de abastecimento) foram encaminhadas para o laboratório da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), para a realização das análises dos seguintes compostos: ácidos voláteis, cálcio, magnésio, potássio, sulfato e compostos nitrogenados.

4.3.1 Determinação de sólidos suspensos

Para a determinação dos sólidos suspensos, utilizou-se o método gravimétrico (APHA, 2005), que consiste na filtração da amostra por meio de uma membrana microporosa com o auxílio de uma bomba de vácuo. Após essa etapa, a membrana é submetida a ciclos de calcinação, secagem e pesagem, com o objetivo de quantificar a massa de sólidos retidos após cada ciclo.

4.3.1.1 Preparação membrana

Inicialmente, realiza-se a lavagem da membrana com 60 mL de água destilada no próprio sistema de filtração a vácuo. Em seguida, a membrana é transferida para um cadinho de porcelana e levada a um forno tipo mufla para calcinação a 550 °C por 15 minutos. Após esse período, o equipamento é desligado e inicia-se o processo de resfriamento.

Quando a temperatura do forno atinge cerca de 300 °C, o conjunto é transferido para uma estufa a 105 °C para estabilização térmica. Por fim, o conjunto é colocado em um dessecador para resfriamento até a temperatura ambiente, garantindo que não ocorra absorção de umidade antes da pesagem.

Figura 7– Vista do conjunto membrana e cadinho



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.1.2 Determinação de sólidos suspensos totais, fixos e voláteis

Pelo método gravimétrico (APHA, 2005), no primeiro momento, realiza-se a pesagem inicial da membrana. Logo após, procede-se com a filtração de 50 mL da amostra no sistema a vácuo utilizando a referida membrana.

Figura 8– Sistema de filtração com bomba de vácuo



Fonte: Autoria própria (2025)

O conjunto (membrana e cadinho) é mantido em estufa a 105 °C por um período de aproximadamente 24 horas para a secagem completa. Após esse intervalo, o conjunto é transferido para um dessecador, onde permanece até atingir a temperatura ambiente. Com a membrana devidamente seca, realiza-se uma nova pesagem para determinar a massa final.

Figura 9– Vista da membrana após o processo de filtração e secagem



Fonte: Autoria própria (2025)

Com as informações da massa inicial e final da membrana, é determinado os sólidos suspensos totais (SST) em mg/L, utilizando a Equação 4. O volume da amostra (V), como mencionado anteriormente, foi de 50 mL, e M é a massa da membrana em miligrama (mg).

$$SST [mg/L] = \frac{(M_{pós\ secagem} - M_{inicial}) \cdot 1000}{V [mL]} (4)$$

Posteriormente, o conjunto foi levado ao forno tipo mufla, onde se realizou a calcinação a 550 °C por um período de aproximadamente 40 minutos. Após esse tempo, de forma análoga ao procedimento descrito na etapa de preparação da membrana, o conjunto foi transferido para a estufa e, em seguida, para o dessecador. Ao atingir a temperatura ambiente, realizou-se uma nova pesagem da membrana.

Por fim, os sólidos suspensos fixos (SSF) e os sólidos suspensos voláteis (SSV) são calculados utilizando-se, respectivamente, as Equações 5 e 6.

$$SSF [mg/L] = \frac{(M_{pós\ calcinação} - M_{inicial}) \cdot 1000}{V [mL]} (5)$$

$$SSV [mg/L] = \frac{(M_{pós\ secagem} - M_{pós\ calcinação}) \cdot 1000}{V [mL]} (6)$$

5 RESULTADOS

5.1 PROCESSO DE FILTRAÇÃO

Ao contrário da filtração descendente tradicional, no ensaio a filtragem foi configurada para o fluxo percorrer o meio filtrante da maior para a menor granulometria. Essa escolha justifica-se pela função específica de cada camada: o pedregulho atua na distribuição uniforme do fluxo do efluente, evitando caminhos preferenciais na coluna; a areia constitui a etapa principal de filtração, sendo responsável pela remoção da maior parte dos sólidos suspensos; e, por fim, a resina mista tem o papel de polimento, removendo impurezas menores, como íons, devido à sua capacidade de reter tanto compostos aniônicos quanto catiônicos.

A filtração das amostras de água bruta na coluna experimental ocorreu com sucesso. Visualmente, as amostras de água tratada apresentaram resultados satisfatórios, exibindo um aspecto translúcido e sem a presença aparente de material particulado em suspensão. Na Figura 10, é possível observar a comparação visual entre as amostras de água bruta e a água pós-filtração.

Figura 10 – Comparação visual das amostras de água pré e pós-tratamento em diferentes condições de operação do lavador Venturi: A) Água bruta (300 L/h); B) Água bruta (400 L/h); C) Água bruta (500 L/h); D) Água tratada (300 L/h); E) Água tratada (400 L/h); F) Água tratada (500L/h)



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 11 – Comparação da membrana pós filtração das amostras de água

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 11, observam-se as membranas após o processo de filtração, dispostas da esquerda para a direita de acordo com a vazão do Venturi: 300, 400 e 500 L/h. As membranas da fileira superior correspondem às amostras de água bruta, enquanto as da fileira inferior representam a água filtrada.

Constata-se uma elevada concentração de sólidos retidos nas membranas das amostras de água bruta, evidenciada por sua coloração escura e densa. Em contrapartida, as membranas das amostras de água filtrada não apresentam alterações visíveis, mantendo-se “limpa”. Esse contraste constitui uma evidência visual clara da alta eficiência da coluna de filtração na remoção de sólidos em suspensão.

5.2 ANÁLISES FÍSICOS-QUÍMICAS

No total, foram realizadas análises de 10 amostras (cinco de água bruta e cinco de água tratada). Os resultados obtidos estão apresentados respectivamente nas Tabelas 3 e 4.

Vale ressaltar que, para os parâmetros que não foram possíveis de determinar, pois suas concentrações se encontravam abaixo do limite de detecção da metodologia analítica, os valores foram considerados nulos (zero).

Tabela 3 – Valores obtidos da análise das amostras de água bruta

Propriedades	Vazão do Lavador Venturi (L/h)				
	250	300	400	450	500
Turbidez (NTU)	29,67	109,00	66,00	6,00	40,00

Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	57,60	45,95	40,59	36,52	40,76
Ph	7,21	7,08	6,28	-	6,70
SST (mg/L)	71,00	222,00	86,00	31,00	62,00
SSF (mg/L)	55,00	144,00	10,00	13,00	14,00
SSV (mg/L)	16,00	78,00	76,00	18,00	48,00
Ácido Voláteis (mg/L)	2,00	10,00	15,00	7,00	8,00
Cálcio (mg/L)	9,35	11,20	12,53	7,16	8,24
Magnésio (mg/L)	2,34	3,18	2,08	5,75	2,22
Nitrogênio Nitrito (mg/L)	0,00	0,01	0,00	0,06	0,01
Nitrogênio Nitrato (mg/L)	1,32	3,12	2,30	1,08	1,59
N. Amoniacal (mg/L)	0,05	0,31	1,25	0,10	0,14
Potássio (mg/L)	5,70	52,00	3,30	3,40	4,40
Sulfato (mg/L)	8,00	32,00	6,00	9,00	13,00

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 4 – Valores obtidos da análise das amostras de água tratada

Propriedades	Vazão do Lavador Venturi (L/h)				
	250	300	400	450	500
Turbidez (NTU)	4,33	1,00	1,00	0,00	1,00
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	5,58	13,23	2,03	3,30	2,03
pH	7,86	5,79	5,44	6,35	5,35
SST (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SSF (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SSV (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ácido Voláteis (mg/L)	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Cálcio (mg/L)	0,54	0,72	0,84	0,00	0,95
Magnésio (mg/L)	0,07	0,09	0,09	0,02	0,10
Nitrogênio Nitrito (mg/L)	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Nitrogênio Nitrato (mg/L)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,11
N. Amoniacal (mg/L)	0,00	0,02	0,02	0,00	0,07
Potássio (mg/L)	0,60	0,90	0,80	0,30	0,70
Sulfato (mg/L)	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Fonte: Autoria própria (2025)

5.3 EFICIÊNCIA DA COLUNA

A partir dos dados das análises físico-químicas realizados antes e após a filtração, calculou-se a variação percentual de cada parâmetro para quantificar a eficiência de remoção do sistema.

Inicialmente, avaliou-se o parâmetro de sólidos suspensos. Os dados demonstram a ausência de sólidos suspensos totais (SST) nas amostras de água tratada, evidenciando que a coluna foi plenamente eficaz na remoção dessas partículas. Sob o aspecto visual, observou-se o acúmulo de material particulado na zona de interface entre as camadas de pedregulho e areia. Esses resultados confirmam a efetividade da areia na retenção de sólidos de maior granulometria por meio da filtração mecânica.

Além disso essa eficiência de remoção manteve-se constante em 100% para todas as condições de operação de vazões de água no Venturi testadas (250, 300, 400, 450 e 500 L/h). Tal comportamento indica que o leito filtrante foi capaz de reter integralmente os sólidos suspensos, não atingindo o seu ponto de saturação durante o período experimental.

Outro parâmetro que corrobora a remoção de sólidos é a turbidez das amostras, cujos valores estão apresentados na Tabela 5. Os dados indicam uma redução acentuada de turbidez, com uma eficiência média de 95%. Este resultado ratifica a afirmação anterior sobre a alta capacidade de remoção de material particulado pelo sistema de filtração.

Tabela 5 – Eficiência de remoção de turbidez em diferentes vazões operacionais.

Vazões	Turbidez (NTU)		Eficiência de remoção
	Efluente	Filtrado	
250	29,67	4,33	85%
300	109,00	1,00	99%
400	66,00	1,00	98%
450	6,00	0,00	100%
500	40,00	1,00	98%

Fonte: Autoria própria (2025)

Em relação de remoção de íons e sais, com os resultados obtidos das condutividades que estão apresentados na Tabela 6, podemos verificar que a redução da condutividade se deve a retenção de íons pela camada de resina de troca iônica, além disso houve uma boa eficiência de remoção desses compostos sendo na média a variação foi de aproximadamente de 90%.

Tabela 6 – Comparação da Condutividade entre o efluente bruto e o filtrado em função da variação da vazão.

Vazões	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)		
	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção
250	57,60	5,58	90%
300	45,95	13,23	71%
400	40,59	2,03	95%
450	36,52	3,30	91%
500	40,76	2,03	95%

Fonte: Autoria própria (2025)

A eficácia do sistema é comprovada ao analisarmos a remoção de íons específicos presentes na água, como cálcio, magnésio, potássio e sulfato, conforme apresentado na Tabela 7. Os resultados indicam que, para todos esses parâmetros, a eficiência de remoção situou-se em torno de 90%, sendo que, em todos os casos, a concentração final nas amostras de efluente filtrado foi inferior a 1 mg/L.

Tabela 7 – Eficiência de remoção de alguns íons em diferentes vazões.

Vazões	Cálcio (mg/L)			Magnésio (mg/L)			Potássio (mg/L)			Sulfato (mg/L)		
	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção
250	9,35	0,54	94%	2,34	0,07	97%	5,70	0,60	89%	8,00	1,00	88%
300	11,20	0,72	94%	3,18	0,09	97%	52,00	0,90	98%	32,00	0,00	100%
400	12,53	0,84	93%	2,08	0,09	96%	3,30	0,80	76%	6,00	0,00	100%
450	7,16	0,00	100%	5,75	0,02	100%	3,40	0,30	91%	9,00	0,00	100%
500	8,24	0,95	88%	2,22	0,10	96%	4,40	0,70	84%	13,00	1,00	92%

Fonte: Autoria própria (2025)

Outros compostos presentes em menores concentrações nas amostras de água bruta, como os ácidos voláteis e os compostos nitrogenados, apresentaram uma eficiência de remoção inferior aos parâmetros discutidos anteriormente. Contudo, o sistema ainda demonstrou eficácia satisfatória, com reduções superiores a 50%, conforme detalhado na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação de concentração antes e após a filtração

Vazões	Ácido Voláteis (mg/L)			Nitrogênio Amoniacal(mg/L)			Nitrogênio Nitrato (mg/L)		
	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção	Efluente	Filtrado	Eficiência de remoção
250	2,00	1,00	50%	0,05	0,00	100%	1,32	0,01	99%
300	10,00	2,00	80%	0,31	0,02	94%	3,12	0,00	100%
400	15,00	2,00	87%	1,25	0,02	98%	2,30	0,00	100%
450	7,00	2,00	71%	0,10	0,00	100%	1,08	0,00	100%
500	8,00	2,00	75%	0,14	0,07	50%	1,59	0,11	93%

Fonte: Autoria própria (2025)

Os ácidos voláteis foram os compostos que apresentaram o menor percentual de redução. Conforme apontado por Leite [25], a eficiência da troca iônica para esses ácidos pode ser reduzida devido à interferência de coloides e outros íons. Tais elementos competem com os ácidos orgânicos e, por possuírem maior afinidade com a resina, ocupam os sítios de troca preferencialmente

5.4 CAPACIDADE DE REUSO

Para avaliar o potencial de reuso do efluente tratado, realizou-se a análise de uma amostra proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Araraquara para fins comparativos. Além disso, os resultados foram confrontados com os critérios de qualidade para água de reuso estabelecidos pelo SINDUSCON-SP (Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo) [26].

Esta instituição classifica o aproveitamento de água de reuso em quatro categorias:

1. Lavagem de veículos e tecidos;
2. Usos na construção civil;

3. Irrigação de áreas verdes e jardins;
4. Uso em sistemas de ar-condicionado.

Para os objetivos deste trabalho, serão avaliadas as três primeiras categorias. Na Tabela 9, apresentam-se os resultados das análises e os limites estabelecidos pelas referidas normas. Cabe ressaltar que os dados referentes ao efluente tratado representam a média aritmética dos resultados de todas as amostras filtradas.

Tabela 9 – Comparação dos resultados obtido com os critérios para água de reuso

Propriedades	Efluente filtrado média das amostras	Água da rede de abastecimento	Critérios da SINDUSCON-SP		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
Turbidez (NTU)	1,47	-	<2	-	<5
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	5,23	-	-	-	-
Ph	6,16	6,35	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
SST (mg/L)	0,00	0,00	≤ 5	< 30	<20
SSF (mg/L)	0,00	0,00	-	-	-
SSV (mg/L)	0,00	0,00	-	-	-
Ácido Voláteis (mg/L)	1,80	0,00	Ausente	Ausente	-
Cálcio (mg/L)	0,61	6,29	-	-	-
Magnésio (mg/L)	0,07	1,86	-	-	-
Nitrogênio Nitrito (mg/L)	0,01	0,00	≤ 1	-	-
Nitrogênio Nitrato (mg/L)	0,03	0,98	≤ 10	-	-
N. Amoniacal (mg/L)	0,02	0,01	≤ 20	-	-
Potássio (mg/L)	0,66	2,80	-	-	-
Sulfato (mg/L)	0,40	0,00	-	-	-

Fonte: Adaptado de Rezende (2016); Autoria própria (2025).

Ao compararmos os resultados na Tabela 9, fica claro que o tratamento funcionou muito bem. A água tratada atingiu uma qualidade excelente, batendo quase todas os critérios da Classe 1 do SINDUSCON-SP, que é a categoria mais exigente. Ela se destacou principalmente na clareza (turbidez de 1,47 NTU) e na limpeza total de sujeiras visíveis (zero de sólidos suspensos). O único detalhe que impede essa água de ser usada em lavagens de roupas ou carros (Classes 1 e 2) é a presença mínima de ácidos voláteis (1,80 mg/L), já que a norma pede que eles

sejam inexistentes. Por conta disso, o reuso oficial fica indicado para a Classe 3, que é a irrigação de jardins e áreas verdes.

Um ponto que chama muito a atenção é que, no que diz respeito aos sais e minerais, o tratamento foi tão eficiente que a água final ficou mais "pura" do que a própria água da rede pública que recebemos em casa. Isso demonstra a que o tratamento via coluna filtrante foi eficiente para a remoção de contaminantes e impurezas presentes na água.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs o tratamento da água residual de um lavador Venturi utilizando a filtração, um dos métodos mais tradicionais e eficazes para efluentes. Tanto a confecção da coluna filtrante quanto a sua operação foi realizada de maneira bem-sucedida. A escolha e a disposição dos diferentes materiais no leito resultaram em uma elevada eficiência de remoção, os ensaios mostraram que o sistema foi capaz de remover integralmente os sólidos suspensos totais (100%) e reduzir a turbidez e outras propriedades em níveis superiores a 95%, entregando um efluente visualmente límpido.

As camadas de pedregulho e areia retiveram praticamente todos os sólidos suspensos. Outro destaque foi a utilização da resina mista de troca iônica, que permitiu uma remoção acima de 90% de íons como cálcio, magnésio, nitrogênio, potássio e sulfato. O único parâmetro que não apresentou uma retenção tão elevada foi o de ácidos voláteis, devido à competição iônica e à interferência de coloides na resina; apesar disso, a redução obtida ainda foi superior a 50%.

Quanto à viabilidade de reuso, ao comparar os resultados com a água da rede de abastecimento público, o efluente tratado apresentou pureza iônica superior à água da rede em diversos parâmetros minerais e de condutividade. Além disso, o tratamento atendeu com folga aos critérios da Classe 3 do SINDUSCON-SP, sendo plenamente recomendado para a irrigação de áreas verdes e jardins. Embora a presença residual de ácidos voláteis tenha impedido o enquadramento nas Classes 1 e 2 devido à exigência normativa de ausência total, os resultados globais confirmam a eficácia do sistema confeccionado para o tratamento do efluente proposto.

REFERÊNCIAS

- (1) ECOGEN BRASIL. **Conversão de biomassa em utilidades na indústria: vapor e energia elétrica de forma renovável**. São Paulo, 11 jun. 2025. Disponível em: <https://www.ecogenbrasil.com.br/conversao-de-biomassa-utilidades-industria/>. Acesso em: 15 jan. 2026
- (2) BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. Biomassa: resíduos que são transformados em energia**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biomassa-residuos-que-sao-transformados-em-energia>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- (3) EXAME. **A biomassa pode liderar transição energética no Brasil?** São Paulo, 2024. Disponível em: <https://exame.com/esg/a-biomassa-pode-liderar-transicao-energetica-no-brasil/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- (4) CIESLINSKI, Juliana Esteves Fernandes. **Estudo da emissão e do controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa**. 2014. 157 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.
- (5) HONDA, V. et al. Análise numérica CFD da dispersão de líquido em um lavador Venturi de seção retangular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais [...]**. São Paulo: Blucher, 2015. p. 6385-6392. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-1955-16685-151742.
- (6) SILVA, A. P. S. da; COSTA, M. A. M.; CIESLINSKI, J. E. F.; CARVALHO JR, J. A. de.; GOMES, T.; ALMEIDA FILHO, F. de; MARCONDES, F. F.; "AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO LAVADOR DE GASES DO TIPO VENTURI NO CONTROLE DAS EMISSÕES DE GASES E PARTICULADOS EMITIDOS NA COMBUSTÃO DE MARAVALHA DE PINUS", p-6741-6748. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [= Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]**. São Paulo: Blucher, 2015. ISSN 23591757, DOI 10.5151/chemeng-cobeq2014-0190-26600-181691
- (7) RIBEIRO, José Tarcísio. **Tratamento de Água por Filtração Direta Ascendente para Fins de Reuso**. Campinas, 1998. Disponível em: <http://bt.fatecsp.br/system/articles/137/original/josetarcisioribeiro.pdf> Acesso em: 16jan. 2026.
- (8) COSTA FILHO, Edilson Holanda; MATOS, José Manuel de Saldanha Gonçalves; STEFANUTTI, Ronaldo. Overview of Reuse of Treated Waste Water. **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, São Paulo (SP), v. 18, n. 4, p. e04692, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n4-051. Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/4692>. Acesso em: 16jan. 2026.

- (9)RICHTER, C. A. **Água**: métodos e tecnologia de tratamento. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 16jan. 2026.
- (10)SILVA, A. S.; SOUZA, F. E. P. Histórico da ação estatal brasileira no fomento à bioeconomia. In: SILVA, A. S. et al. (org.). **Bioeconomia e o Brasil**: oportunidades e desafios. Brasília: Ipea, 2022. cap. 1, p. 23-44. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11115/4/Cap.1_Historico_da_acao_es_tatal.pdf. Acesso em: 18jan. 2026.
- (11)CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Histórico da Política das Águas. Fortaleza**, [202-]. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/historico-politica-das-aguas/>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- (12)BRAILE, Pedro Márcio et al. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo: CETESB, 1993. 764 p. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2843>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- (13)PIVELI, Roque Passos. **Aula 5**: Características físicas das águas: cor, turbidez, sólidos, temperatura, sabor e odor. São Paulo: USP, [202-]. Notas de aula do curso Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos.
- (14)DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. 2 v. ISBN 9788576560685.
- (15)EPAL. Empresa Portuguesa das Águas Livres. **Dureza da Água**. Lisboa, [202-]. Disponível em: <https://www.epal.pt/EPAL/docs/default-source/agua/ficha-dureza.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- (16)BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Oxigênio Dissolvido (OD)**. Brasília, DF: ANA, [202-]. Disponível em: <https://qualidadedaagua.ana.gov.br/od.html>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- (17)SABOGAL PAZ, Lyda Patricia. **Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno porte**. 2007. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/T.18.2007.tde-03062008-122118. Acesso em: 18 jan. 2026.
- (18)BALDEZ, S. D. **Estudo de dimensionamento de filtro lento retrolavável de camada simples (areia) e dupla camada filtrante (areia e antracito)**. 2023. 68 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, RS, 2023.
- (19)CORNÉLIO, Luana Alves dos Santos. **Avaliação do tratamento de água por filtração rápida descendente com uso de areia de britagem – remoção de turbidez e de indicadores bacterianos**. 2021. 252 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.

(20)ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992. 18 p.

(21)MENDES, L. V. R.; MELO, T. M. **Avaliação da esfericidade como um fator de forma na interação partícula-fluido**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

(22)POERSCH, Fernanda. **Sistema de filtros lentos descendentes com retrolavagem sem reservatório elevado**. 2012. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/124861>. Acesso em: 20 jan. 2026.

(23)SCALIZE, Paulo Sérgio. **Saneamento e Saúde Ambiental**: Módulo 5 – Saneamento. Goiânia: CIAR/UFG, [s.d.]. Disponível em: https://publica.ciar.ufg.br/ebooks/saneamento-e-saude-ambiental/modulos/5_modulo_saneamento/02-1.html. Acesso em: 20jan. 2026.

(24)PUROLITE. **Purolite™ MB400**: Poliestirênico Gel, Resina Mista, Forma de Hidrogênio, Forma de Hidróxido. King of Prussia: Purolite, [s.d.]. Disponível em: <https://www.purolite.com/product/pt/mb400>. Acesso em: 20jan. 2026.

(25)LEITE, José Corrêa. **Produção de ácidos graxos voláteis por fermentação acidogênica em reator anaeróbio de leito fixo e extração em resina de troca iônica e solvente orgânico**. 2005. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

(26)REZENDE, Amanda Teixeira de. **Reúso urbano de água para fins não potáveis no Brasil**. 2016. 92 f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

(27)APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, 21st ed. Washington, 2005.