



FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA “Ministro Ralph Biasi”
Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil

ELAINE MACHADO GARCIA PESTANA

TRATAMENTO DE EFLUENTE PELO PROCESSO DE MEMBRANA - VRM

AMERICANA, SP

2025

ELAINE MACHADO GARCIA PESTANA

TRATAMENTO DE EFLUENTE PELO PROCESSO DE MEMBRANA - VRM

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido em cumprimento à exigência curricular do Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil pelo CEETEPS/Faculdade de Tecnologia – FATEC/Americana.

Área de concentração: tratamento de efluente têxtil

Orientador: Daives Arakem Bergamasco
Doutor

AMERICANA, SP

2025

PESTANA, Elaine Machado Garcia

Tratamento De Efluente Pelo Processo De Membrana - VRM. / Elaine Machado Garcia Pestana – Americana, 2025.

48f.

Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil) - - Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

Orientador: Prof. Dr. Daives Arakem Bergamasco

1. Tratamento de efluentes. I. PESTANA, Elaine Machado Garcia II. BERGAMASCO, Daives Arakem III. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi

CDU: 504.06

Elaborada pelo autor por meio de sistema automático gerador de ficha catalográfica da Fatec de Americana Ministro Ralph Biasi.

TRATAMENTO DE EFLUENTE PELO PROCESSO DE MEMBRANA - VRM

Trabalho de graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Têxtil pelo Centro Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana – Ministro Ralph Biasi.

Área de concentração: tratamento de efluente têxtil.

Americana, 23 de junho de 2025

Banca Examinadora:



Daiyes Arakem Bergamasco (Presidente)
Doutor
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP



Maria Adelina Pereira (Membro)
Mestre
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP



Thiago da Silva Vieira (Membro)
Mestre
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria para superar todos os desafios ao longo dessa caminhada.

Ao meu esposo, pelo amor, paciência, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos. Sua presença foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui, mesmo nos dias mais difíceis.

À minha filha, que é a minha maior inspiração e motivação. Que este trabalho seja também uma prova de que com dedicação e perseverança somos capazes de realizar nossos sonhos.

Aos meus pais, pelo carinho, incentivo e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu orientador e Professor Daives Arakem Bergamasco, pela orientação, dedicação, paciência e por compartilhar seus conhecimentos, fundamentais para a construção deste trabalho.

Aos professores, colegas e amigos que fizeram parte dessa caminhada, oferecendo apoio, aprendizados e encorajamento.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse possível, minha eterna gratidão.

“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso, não temas, nem te espantes, porque o SENHOR teu Deus é contigo, por onde quer que andares. ”
Josué 1:9

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso aborda a crescente relevância do tratamento de efluentes na indústria têxtil brasileira, um setor que, apesar de sua importância econômica, é uma das principais fontes de poluição hídrica devido ao volume e à complexidade de seus resíduos líquidos. O objetivo principal foi avaliar a eficiência dos processos de membrana, especificamente o sistema VRM (Vacuum Rotational Membranes), em comparação com métodos convencionais, como o sistema de lodo ativado (CAS), na remoção de contaminantes de efluentes têxteis. A metodologia envolveu análise comparativa de parâmetros como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), cor e turbidez, utilizando amostras reais da indústria ao longo de quinze dias. Os resultados demonstraram a superioridade do sistema VRM, enquanto o CAS alcançou 83,7% de eficiência na remoção de DQO, o VRM atingiu 91,1%. Em relação DBO₅, o VRM registrou uma média de 18 mg/L, atendendo à legislação (máxima de 60 mg/L), diferentemente do CAS, que apresentou 92 mg/L. Adicionalmente, o VRM mostrou-se significativamente mais eficaz na redução da cor e da turbidez dos efluentes. Concluiu-se que os processos de membrana oferecem uma solução mais eficiente e sustentável para o tratamento de efluentes têxteis, superando os padrões regulatórios e promovendo o reuso da água. Essa tecnologia representa um avanço crucial para a conservação de recursos hídricos e para o desenvolvimento de práticas industriais mais responsáveis e economicamente viáveis.

Palavras-chave: Efluente Têxtil; Processos de Membrana; Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

This undergraduate thesis addresses the growing relevance of wastewater treatment in the Brazilian textile industry, a sector which, despite its economic importance, is one of the main sources of water pollution due to the volume and complexity of its liquid waste. The primary objective was to evaluate the efficiency of membrane processes, specifically the VRM system (Vacuum Rotational Membranes), in comparison with conventional methods such as the activated sludge system (ASS), in the removal of contaminants from textile effluents. The methodology involved a comparative analysis of parameters such as Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD5), color, and turbidity, using real industry samples over a fifteen-day period. The results demonstrated the superiority of the VRM system: while the ASS achieved 83.7% efficiency in COD removal, the VRM reached 91.1%. Regarding BOD5, the VRM recorded an average of 18 mg/L, complying with legislation (maximum of 60 mg/L), unlike the ASS, which showed 92 mg/L. Additionally, the VRM proved to be significantly more effective in reducing both color and turbidity of the effluents. It was concluded that membrane processes provide a more efficient and sustainable solution for textile effluent treatment, surpassing regulatory standards and promoting water reuse. This technology represents a crucial advancement for the conservation of water resources and the development of more responsible and economically viable industrial practices.

Keywords: Textile Effluent; Membrane Processes; Wastewater Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo industrial têxtil	144
Figura 2 - Fluxograma do tratamento de efluente de lodo ativado convencional CAS	344
Figura 3 - VRM na câmara de filtração vazia	366
Figura 4 - Módulo da membrana de placa plana do VRM	399
Figura 5 - Câmara de filtração do VRM com efluente	411
Figura 6 - Tratamento de efluente pelo processo de membrana VRM.....	411

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores padrão de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora	30
Tabela 2: Características gerais dos processos de separação por membranas	38
Tabela 3: Resultados entre os sistemas CAS e VRM	433

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- NBR - Norma Brasileira
- pH - Potencial Hidrogiônico
- CAS - *Activated Sludge System* (Sistema de Lodo Ativado Convencional)
- NTU - *Nephelometric Turbidity Unit* (Unidade de Turbidez Nefelométrica)
- COD - *Chemical Oxygen Demand* (Demanda Química de Oxigênio)
- BOD5 - *Biochemical Oxygen Demand* (Demanda Bioquímica de Oxigênio)
- SST - Sólidos Suspensos Totais
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- OD - Oxigênio Dissolvido
- COPAM - CERH/MG - Conselho Estadual de Política Ambiental e do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais
- PCI - *Pressurized Cyclic Injection* (Injeção Cíclica Pressurizada)
- DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
- DQO - Demanda Química de Oxigênio
- ED - Eletrodialise
- MF – Microfiltração
- NF – Nanofiltração
- UF – Ultrafiltração
- OR – Osmose Reversa
- ETE – Estação de Tratamento de Efluente
- FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
- Pt Co – *Platinum-Cobalt Scale* (Escala Platino Cobalto Unidade de Cor)
- VRM – *Vacuum Rotational Membrane* (Membrana Rotacional a Vácuo)
- MBR – *Membrane Bio Reactor* (Biorreator de Membrana)
- PIB – Produto Interno Bruto
- IEMI – Instituto de Estudos e Marketing Individual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	13
2.1	Indústria têxtil no Brasil	13
2.2	Etapas de produção têxtil.....	13
2.2.1	Fiação	15
3	EFLUENTES INDUSTRIAIS	31
3.1	Classificação dos métodos de tratamento de efluentes	31
3.2	Tratamento de Efluente de Lodos Ativados Convencionais (CAS)	33
3.3	Processos de separação por membranas.....	35
4	RESULTADOS ENTRE OS SISTEMAS DE LODO ATIVADO CONVENCIONAL (CAS) E PELO PROCESSO DE MEMBRANA (VRM)	43
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes na indústria têxtil é um tema de crescente relevância, especialmente no contexto das preocupações ambientais e da sustentabilidade industrial. Este trabalho aborda o uso de processos de membrana para o tratamento de efluente têxteis, destacando suas principais etapas e conceitos. A indústria têxtil, umas das maiores empregadoras do setor de transformação no Brasil, é também uma das principais fontes de poluição hídrica devido ao volume significativo de efluentes gerados durante suas operações. Esses efluentes contém uma variedade de substâncias químicas, corantes e sólidos suspensos que, se não tratados adequadamente, podem causar sérios impactos ambientais.

A importância do tema reside na necessidade urgente de mitigar os efeitos negativos da poluição industrial sobre o meio ambiente. A indústria têxtil brasileira, responsável por uma parcela significativa do PIB industrial, enfrenta o desafio de equilibrar crescimento econômico com práticas sustentáveis. O tratamento de efluente por processos de membrana oferece uma solução importante para a remoção eficaz de contaminantes, reduzindo a carga poluente e permitindo o reuso da água.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a eficiência dos processos de membrana no tratamento de efluentes têxteis, comparando-os com métodos convencionais. Espera-se demonstrar que o uso de membranas pode aumentar significativamente a remoção de contaminantes, como a demanda química de oxigênio (DQO), a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a turbidez, além de reduzir a cor dos efluentes. Os resultados esperados incluem uma análise detalhada da eficiência de remoção de poluentes e uma discussão sobre a viabilidade econômica e ambiental da implementação desses sistemas em larga escala. Ao final, o trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de práticas industriais mais sustentáveis, alinhadas com as regulamentações ambientais vigentes e as expectativas da sociedade por um desenvolvimento industrial responsável.

Este estudo se baseia em dados reais da indústria têxtil brasileira, fornecendo uma perspectiva prática e aplicável das tecnologias de tratamento de efluentes, e busca oferecer soluções que possam ser adotadas por empresas do setor, promovendo um impacto positivo tanto ambiental como econômico.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Indústria têxtil no Brasil

O Brasil é um importante produtor mundial de artigos têxteis, sendo a maior cadeia têxtil completa do Ocidente. A indústria têxtil no Brasil destaca-se como a segunda maior empregadora na indústria de transformação, além disso o país figura como o quinto maior produtor mundial de têxteis, conforme a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2023).

Segundo estudos recentes conduzidos pelo Instituto de Estudos e Marketing Individual (IEMI) a indústria têxtil e de confecção registrou um faturamento de R\$ 161 bilhões em 2020, aumentando para R\$ 190 bilhões em 2021. A produção têxtil também registrou crescimento, passando de 1,91 milhões de toneladas em 2020 para 2,16 milhões de toneladas em 2021. Como resultado desse crescimento, foram gerados 1,34 milhões de empregos diretos (IEMI, 2022), além de 8 milhões quando consideramos empregos indiretos e o impacto na renda, dos quais 60,0% desses empregos são ocupados por mulheres. Em 2021, o setor representou 19,5% do total de trabalhadores na produção industrial e contribuiu com 6,0% do valor total da produção da indústria brasileira de transformação (ABIT, 2023).

2.2 Etapas de produção têxtil

As etapas da cadeia produtiva têxtil global são interdependentes, ou seja, elas precisam do produto obtido no estágio anterior para que possam acontecer. Contudo, essas etapas possuem relativa independência, e assim, admitem a coexistência tanto de firmas especializadas em somente uma etapa do processo produtivo quanto de empresas totalmente verticalizadas (FIEMG, 2014).

À vista disso, independente dos fatores como tecnologia e escala de produção, o produto gerado em qualquer etapa do processo produtivo é capaz de alimentar o estágio subsequente, seja dentro de uma mesma empresa verticalizada ou sendo fornecido para outras firmas utilizarem como matéria-prima (FIEMG, 2014).

A análise e mapeamento das fases do processo de produção, juntamente com suas operações unitárias, dentro do contexto da indústria têxtil, desempenham uma

importância essencial na previsão e na definição dos aspectos ambientais relacionados à fabricação têxtil. Essa abordagem possibilita a identificação e avaliação das entradas e saídas em cada estágio do processo, permitindo a determinação dos principais efeitos adversos sobre o meio ambiente, tornando assim viável a qualificação e quantificação desses problemas. Nesse sentido, é propício a implementação de ações positivas, tais como a adaptação e modificação das operações unitárias e a diminuição da carga poluente por meio de medidas mitigadoras, com o objetivo de minimizar os impactos prejudiciais (FIEMG, 2014).

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo industrial têxtil.

Figura 1 - Fluxograma do processo industrial têxtil



Fonte: adaptado Leão *et al.* (2002), FIEMG (2014).

2.2.1 Fiação

A fiação é o processo em que a matéria prima, as fibras têxteis ou filamentos têxteis, são transformados em fios. A partir da combinação de fios naturais com fios químicos é possível obter uma grande diversidade de tecidos (Pezzolo, 2017). O fio pode ser descrito, de forma geral, como um conjunto de fibras lineares ou filamentos que se unem para criar uma linha contínua, apresentando propriedades têxteis. Entre as características têxteis fundamentais, destaca-se a boa resistência (durabilidade) e a alta flexibilidade (FIEMG, 2014).

As características físicas da matéria-prima fibrosa têm grande impacto na escolha do processo de fiação a ser adotado. Tanto as fibras sintéticas quanto as fibras naturais passam por procedimentos de fiação similares, começando com a etapa de preparação para a fiação. Posteriormente, o processo pode diferenciar em fiação penteada, fiação convencional (cardada) e fiação não convencional (*open-end*). Em todos esses métodos, diversas operações são conduzidas para abrir e limpar as fibras, orientadas em uma direção, paralelizadas e torcidas, de forma a assegurar que se prendem umas às outras por meio do atrito (FIEMG, 2014).

2.3 Preparação da tecelagem

Na etapa de preparação da tecelagem ou tratamentos prévios os fios passam por uma sucessão de operações de preparação, antes de serem processados no tear. Os principais processos de preparação são a urdição e a engomagem (FIEMG, 2014).

A urdição tem como propósito produzir um conjunto de fios paralelos, rigidamente individualizados, com igual tensão e de mesmo comprimento, ordenados no sentido longitudinal na exata ordem que o tecido final precisa. Esses fios são enrolados em um eixo, que é intitulado rolo de urdume. Em seguida, o rolo de urdume pode ser colocado na parte posterior dos teares ou pode ser encaminhado para a próxima etapa de preparação, a engomagem (FIEMG, 2014). Caso um fio arrebentar, o processo é interrompido até encontrar o local exato para que a emenda dos fios seja identificada e a correção seja feita. Esse procedimento de parar o tear, localizar a emenda e fazer a retomada da operação demanda muito tempo, por essa razão, alguns fios são reforçados na etapa de engomagem (Alcântara; Daltin, 1996).

A engomagem é um processo contínuo que se desdobra em várias etapas, com objetivos diferentes entre si, porém com apenas um propósito: engomar o fio para deixá-lo mais resistente mecanicamente por meio da adição de goma e aquecimento (FIEMG, 2014), a fim de melhorar a aderência entre as fibras (Alcântara; Daltin, 1996). Essa aplicação de revestimento de goma, quer seja natural ou sintética, é realizada sobre os fios de urdume, preparando-os para a seguinte fase de tecimento (Bastian; Rocco, 2009). A goma ideal deve apresentar as seguintes características: capacidade de aderência, forte coesão, poder de penetração, capacidade de formar película, elástica e resistente à ruptura, resistente a abrasão, fluida, flexível e maleável, resistente ao mofo, fácil de retirar e economicamente acessível (Alcântara; Daltin, 1996). É gerado despejo industrial nesse procedimento (Braile; Cavalcanti, 1993).

2.3.1 Tecelagem plana

A tecelagem tem como objetivo transformar os fios obtidos na fiação em panos (Braile; Cavalcanti, 1979). O tear é a máquina que possibilita o entrelaçamento ordenado de dois conjuntos de fios, transversais e longitudinais, para formação da trama do tecido. Seu funcionamento é realizado com quatro elementos principais e são eles: urdume, trama, cala e pente (Pezzolo, 2017).

Os tecidos são classificados de diversas formas. Quanto a sua formação, eles podem ser divididos em tecidos planos, tecidos de malha, tecidos não tecidos, de laçada, e especiais (Pezzolo, 2017).

2.3.2 Tecido plano

O tecido plano é composto pelo entrelaçamento de dois conjuntos de fios em ângulo reto (90°). Ele é formado pelo urdume e pela trama, os fios de urdume são colocados no sentido longitudinal ao tecido, e já os fios da trama são aplicados no sentido transversal, perpendicular ao urdume. As principais variações do tecido plano são: liso, estampado, maquinado e jacquard (Pezzolo, 2017). Nesse processo não é formado efluente líquido, e dessa forma, é considerado um processo seco (Braile; Cavalcanti, 1993).

Os teares, empregados na tecelagem plana foram classificados em diferentes gerações, segundo a sua evolução e o surgimento de novas tecnologias. A primeira

geração de teares engloba os modelos mais tradicionais, frequentemente equipados com lançadeiras, operando a uma velocidade mais baixa e com limitações na largura do tecido. No entanto, eles são capazes de produzir uma ampla variedade de tecidos planos (FIEMG, 2014).

Por outro lado, os teares mais modernos são subdivididos em duas categorias: teares de segunda geração, que englobam teares de projétil e teares de pinça, e teares de terceira geração, que incluem equipamentos mais avançados operando com jatos de ar ou jatos de água. Esses teares se destacam por sua alta velocidade de produção e pela ausência de restrições quanto à largura dos tecidos, tornando-os ideais para atender às necessidades das grandes empresas de confecção. Além disso, demonstram uma eficiência alta na etapa de produção (FIEMG, 2014).

2.3.3 Malharia

A malharia foi criada a partir do processo de mecanização da tricotagem (Alcântara; Daltin, 1996). O tecido malha é originado do entrelaçamento das laçadas de um ou mais fios, nesse tipo de tecido, os fios não se cruzam. Tecidos malha podem ser agrupados em três tipos: malhas de urdume ou teia, malhas de trama e malhas mistas (Pezzolo, 2017). Nesta operação, não há geração de despejos líquidos, portanto, é classificado com um processo seco (Braile; Cavalcanti, 1993).

2.3.4 Tecido de malha

As máquinas utilizadas na indústria de malharia, conhecidas como teares circulares, estão experimentando um progresso notável devido ao avanço tecnológico contínuo. A cada nova geração, esses teares se tornam mais eficazes e produtivos. O termo "circular" é devido à disposição circular dos alimentadores, resultando na produção de um tecido tubular contínuo. Além de proporcionarem um alto rendimento, eles são altamente versáteis, permitindo a fabricação de uma ampla variedade de tipos de materiais. Os teares circulares podem ser divididos em duas categorias: de grande diâmetro, adequados para a produção de malhas duplas e outros tipos de tecidos de malha; e de pequeno diâmetro, ideal para a fabricação de meias, sacos, galões, cadarços, entre outros produtos (FIEMG, 2014).

2.4 Beneficiamento

O processo de beneficiamento têxtil tem como finalidade aprimorar as características físico-químicas dos substratos têxteis, que podem incluir fibras, fios, tecidos planos, tecidos malha, peças confeccionadas. Esse processo envolve uma série de etapas e procedimentos heterogêneos, já que cada material exige preparações únicas segundo a necessidade do seu aproveitamento (FIEMG, 2014). Dessa forma, na etapa final, é possível conferir características singulares a cada substrato têxtil (Pezzolo, 2017).

Portanto, o beneficiamento inclui todas as fases de modificação do tecido, incluindo melhorias na aparência, aumento da resistência, sensação ao toque, capacidade de absorver água, entre outros. Essas etapas compreendem o pré-tratamento, a tinturaria, a estamparia e o acabamento final (Alcântara; Daltin, 1996).

2.4.1 Beneficiamento primário

A fase inicial do beneficiamento têxtil é conhecida como beneficiamento primário ou preparação ou etapa inicial. Durante essa etapa, o tecido é preparado para ser submetido às operações posteriores, tornando-se apto para receber coloração parcial ou total, e, por conseguinte, para o acabamento final. Para alcançar esse estágio, os tecidos passam por uma variedade de processos a fim de remover óleos, ceras, pigmentos, marcações e sujeiras oriundos das etapas de fiação e tecelagem (FIEMG, 2014). Os principais processos envolvidos no beneficiamento primário são: limpeza, desengomagem, alvejamento, navalhagem, chamuscagem e mercerização.

A limpeza (ou purga, cozimento) tem finalidade de eliminar substâncias indesejáveis que as acompanham (Pezzolo, 2017), principalmente materiais oleosos (Alcântara; Daltin, 1996), através da emulsão, saponificação e solvência (Bastian; Rocco, 2009). Durante esse processo é gerado esgoto industrial (Braille; Cavalcanti, 1993).

A desengomagem é o processo de eliminar a "goma" que foi sobreposta ao fio de urdume durante o procedimento de engomagem de fios, realizado para facilitar a tecelagem (Bastian; Rocco, 2009). É realizada com substâncias bioquímicas ou químicas, e tem como objetivo tornar o material têxtil rígido, resistente e mais

absorvente (Pezzolo, 2017). Nesse processo é gerado efluente (Braile; Cavalcanti, 1993).

O alvejamento tem por finalidade eliminar a coloração amarelada, natural, do substrato têxtil (Bastian; Rocco, 2009). Essa etapa também pode remover outras impurezas que ainda possam existir, além de preparar para os processos subsequentes: branqueamento óptico, tinturaria ou estampagem (Pezzolo, 2017). Neste processo, ocorre a geração de efluentes (Braile; Cavalcanti, 1993).

No processo de navalhagem, as pontas das fibras salientes são removidas por meio do corte. Essas fibrilas conferem uma textura áspera e dessa forma causam complicações na confecção dos estampados (Pezzolo, 2017).

A chamuscagem ou flambagem é a etapa em que as fibrilas da superfície do substrato têxtil são queimadas (Bastian; Rocco, 2009). Nesse processo não são gerados efluentes (Alcântara; Daltin, 1996).

A mercerização é um tratamento aplicado às fibras de algodão ou linho para melhorar diversas características, incluindo maior brilho, estabilidade dimensional, resistência, absorção de água e corantes, toque mais suave e eficiência de tingimento. A fibra mercerizada requer menos corante em comparação com a fibra não mercerizada, resultando em economia de corantes, especialmente em cores escuras, onde a redução pode chegar a 25-30,0% (Alcântara; Daltin, 1996). São gerados despejos industriais nessa operação (Braile; Cavalcanti, 1993).

2.4.2 Beneficiamento secundário

O beneficiamento secundário ou etapa secundária é composta pelas etapas de tingimento e estamparia. O tingimento ou tinturaria tem como objetivo proporcionar cor aos substratos têxteis. Já a estamparia, é realizada por vários processos, e tem como finalidade imprimir um desenho decorativo ao tecido (Pezzolo, 2017). No processo de tingimento é realizada a coloração total do tecido, já no processo de estamparia a coloração é apenas parcial (FIEMG, 2014). Nas duas técnicas são gerados efluentes líquidos (Braile; Cavalcanti, 1993).

O tingimento tem como finalidade conferir cor ao substrato têxtil (Bastian; Rocco, 2009), para conferir cor ou mudar a cor é aplicado nesta etapa corantes ao material têxtil. Não existe fibra que seja capaz de ser colorida por todos os corantes existentes assim como não existe corante que colore todas as fibras conhecidas. O

tingimento envolve uma grande diversidade de corantes e auxiliares da tinturaria e sendo assim, é considerada um dos processos mais complexos dentro dos procedimentos de beneficiamento têxtil. A tinturaria é composta por três estágios: a montagem, a fixação e o tratamento final (Alcântara; Daltin, 1996).

A etapa de montagem envolve a transferência do corante da solução para a superfície do substrato têxtil, essa operação pode ser executada por meio de esgotamento ou impregnação. Já a fixação do corante ocorre por meio da sua interação com o tecido, da conversão do corante insolúvel para uma forma solúvel ou da alteração da estrutura da fibra, passando de um estado expandido para um estado mais compacto por efeito da temperatura. Na fase final, o excesso de corante é removido através de lavagem quente com detergentes, e posterior enxágue em água corrente, isso previne que o corante não fixado na fibra se solte quando o tecido entrar em contato com umidade novamente, como suor ou lavagem, evitando manchas em outras roupas durante o mesmo ciclo de lavagem (Alcântara; Daltin, 1996).

Os corantes são classificados de diferentes formas, sendo as principais dela, aplicação no substrato têxtil e estrutura química, também podem ser classificados quanto: à solidez em geral, a exposição à luz, o tipo de excitação eletrônica, entre outros (Bastian; Rocco, 2009). Os corantes são classificados segundo a aplicação na fibra têxtil em:

Corantes ácidos: compreende uma classe de corantes aniônicos que podem conter de um a três grupos sulfônicos. São solúveis em água devido aos grupos substituintes ionizáveis e tem grande importância na forma de aplicação eficaz do corante na fibra. São substâncias que apresentam estrutura química baseada em grupos antraquinona, azina, azo, ketonimina, nitro e nitroso, triarilmetano, xanteno, que oferecem uma extensa porção de coloração e grau de fixação (Guaratini; Zanoni, 2000). Esses corantes são utilizados para fazer a tinturaria das fibras proteicas (lã e seda) e de poliamida. O processo de tingimento é realizado em banho aquoso, juntamente com o corante, um sal e um ácido, sendo que algumas classes desse corante podem ser tingidas sem o ácido (Alcântara; Daltin, 1996).

Corantes a cuba: são também chamados de corantes a tina e de redução. São insolúveis em água, contudo por meio da redução com hidrossulfito de sódio em meio básico, se transformam em leuco, derivados solúveis, e conseguem tingir as fibras celulósicas (Alcântara; Daltin, 1996). Logo após a oxidação pelo ar, o peróxido de hidrogênio e outros são regenerados a conformação original do corante sobre o

substrato têxtil. Constituem um considerável grupo de corantes com base em antraquinóides, índigos e tioindigóides. Em razão das suas propriedades ótimas de fixação em substratos têxteis podem ser aplicados em diversas fibras, porém é aplicado em maior quantidade em tingimento de algodão e possuem custo elevado. A fabricação do hidrossulfito de sódio resulta em problemas ambientais (Guaratini; Zanoni, 2000).

Corantes ao enxofre: são também denominados de corantes sulfurados. Posterior a sua aplicação são caracterizados por compostos macromoleculares contendo ligações de polissulfetos. São utilizados principalmente para tingir fibras celulósicas, e são ótimos para conferir tons escuros e intensos, como o azul, marrom, preto e verde, manifestando uma boa fixação. Não apresentam solubilidade em água e, portanto, são aplicados após serem pré-reduzidos com ditionito de sódio, o que lhes confere solubilidade, em seguida, são reoxidados sobre o material têxtil por meio do contato com o ar. No entanto, os resíduos desses corantes são extremamente tóxicos (Guaratini; Zanoni, 2000) e estão sofrendo substituição pelos corantes sulfurados ecológicos (Alcântara; Daltin, 1996).

Corantes azóicos: são sintetizados sobre o substrato têxtil durante a etapa de tinturaria, a partir de dois compostos: o naftol e uma base não solúvel em água. O naftol é um composto insolúvel em água, no entanto ele é solubilizado pelo hidróxido de sódio, formando o naftolato de sódio, que reage com as fibras celulósicas. A base insolúvel em água é transformada em uma base diazotada por meio de sua solubilização com nitrito de sódio e ácido clorídrico. Em seguida, coloca-se a base diazotada sobre o substrato têxtil com o naftolato. São utilizados em fibras vegetais, a poliamida, a seda natural e a viscose (Alcântara; Daltin, 1996). Não são solúveis em água (Guaratini; Zanoni, 2000).

Corantes branqueadores: são também nominados como branqueadores ópticos ou branqueadores fluorescentes. Nas condições naturais as fibras têxteis são constituídas por compostos orgânicos, o que resulta em uma coloração amarelada devido à absorção de luz, especialmente em comprimentos de onda baixo. A oxidação do material têxtil é realizada na indústria têxtil ou em processos de lavanderia, utilizando alvejantes químicos ou corantes brancos para reduzir a tonalidade desse substrato. Esses corantes contêm grupos azometino, carboxílicos ou etilênicos associados a anéis aromáticos, naftalênicos, pirênicos e sistemas benzênicos (Guaratini; Zanoni, 2000).

Corantes diretos: são também conhecidos como corantes substantivos. São solúveis em água e a ligação do corante junto ao substrato têxtil é realizada por meio de interações de Van der Waals. O tingimento é feito em um banho aquoso adicionando um eletrólito que é responsável por aumentar a força iônica do meio e, por consequência, a compatibilidade do material têxtil pelo corante. Um dos principais corantes diretos é o vermelho congo (Alcântara; Daltin, 1996). São utilizados para colorir fibras celulósicas como o algodão, e a viscose. A classe desses compostos compreende os corantes abrangendo mais de um grupo azo, como o diazo e triazo, ou pré-transformados em complexos metálicos. O principal benefício dos corantes diretos é a alta absorção no decorrer da sua aplicação e por consequência o decréscimo da quantidade de corante liberada no despejo industrial (Guaratini; Zanoni, 2000).

Corantes dispersos: não são solúveis em água, e no passado tingiam o acetato de celulose e, atualmente, são usados em fibras celulósicas e outras fibras hidrofóbicas (Alcântara; Daltin, 1996). Um exemplo dessas fibras hidrofóbicas são fibras sintéticas, como o nylon e poliéster. No processo de coloração são usados agentes dispersantes que geralmente já estão inclusos na elaboração do corante. Os agentes dispersantes possuem cadeias longas que comumente equilibram a suspensão do corante favorecendo a interação da fibra hidrofóbica com o corante (Guaratini; Zanoni, 2000). Os agentes dispersantes geralmente contêm cadeias longas que atuam para manter a suspensão do corante, promovendo o contato entre o corante e a fibra hidrofóbica (Guaratini; Zanoni, 2000).

Corantes pré-metalizados: na posição ortho contém um grupo hidroxila ou carboxila em relação ao cromóforo azo possibilitando formar complexos com íons metálicos. São utilizados em fibras proteicas e poliamida. É aproveitado a capacidade de interação entre os grupos funcionais que possuem pares de elétrons livres e o metal nesse processo de tingimento. Apresenta uma desvantagem ambiental já que nas águas residuárias é encontrada uma alta carga de metal. Os grupos de corantes pré-metalizados mais comuns são os complexos estáveis de cromo: corante (1:1) ou (1:2) (Guaratini; Zanoni, 2000).

Corantes reativos: são caracterizados por possuir um grupo eletrofílico (reativo) que é capaz de formar ligações covalentes com os grupos amino presentes em poliamidas, grupos hidroxila encontrados em fibras celulósicas, e grupos amino, hidroxila e tióis em fibras proteicas. Os principais corantes reativos têm em sua

composição como grupos cromóforos as funções azo e antraquinona e como grupos reativo as funções clorotriazinila e sulfatoetilsulfonila (Guarattini; Zanoni, 2000). São solúveis em água e as reações com o material têxtil são realizadas em meio básico. As propriedades de solidez contribuem para que se obtenha uma infinidade de tons, até mesmo os mais brilhantes (Alcântara; Daltin, 1996).

Corantes naturais: são derivados de materiais animais ou vegetais, com o mínimo ou nenhum processamento químico. São classificados como do tipo mordente, à tina, diretos ou ácidos. Importante destacar que não existem corantes naturais dispersos, azóicos ou à base de enxofre (Furlan, 2008).

Para escolher o corante ideal para cada tipo de fibra, deve ser levado em conta as características a seguir (Alcântara; Daltin, 1996):

Afinidade: Depois da tinturaria o corante precisa ser parte integrante do material têxtil.

Economia: A dosagem de corantes, produtos auxiliares e tempo de realização do tingimento não podem ultrapassar as quantidades estritamente necessárias.

Igualização: Em toda a dimensão do substrato têxtil a cor deve se apresentar uniforme.

Solidez da cor (resistência): O corante precisa ser resistente aos desencadeadores de alteração e transferência de cor como a água clorada, lavagem, luz, suor e outros.

Os pigmentos também podem ser aplicados na coloração da fibra têxtil. Porém, diferentemente do corante, para poder fazer o uso do pigmento é necessário aplicar ligantes ao material têxtil. Esses ligantes são polímeros que irão fazer a adesão do pigmento à fibra. Dessa maneira, o que diferencia o corante do pigmento, é que o pigmento não possui afinidade física ou química com o substrato têxtil. Apesar de serem aplicáveis em diversas fibras, os pigmentos são utilizados principalmente em algodão e em misturas com poliéster na tinturaria (Alcântara; Daltin, 1996).

Na estamparia, geralmente, os padrões estampados se repetem regularmente em intervalos definidos, e cada cor é aplicada em uma etapa separada. O número usual de núcleos varia de 1 a 6, podendo chegar a 20 em produtos de alta qualidade (Beltrame, 2000).

As etapas da estamparia consistem em 5 etapas e são elas: preparação da pasta de estampar, estampagem, secagem, fixação e tratamentos posteriores (Beltrame, 2000). A estampagem é a principal operação da estamparia e ela pode

ocorrer por quadro manual, quadro automático, transfer, quadro rotativo e a rolo (FIEMG, 2014).

Na estampagem quadro manual ou serigrafia, o quadro é formado por uma tela com verniz, exceto nas áreas do desenho, a pasta de estampar é aplicada no tecido fixo enquanto dois operadores movem o quadro com uma racla. Já a estampagem a quadro automático é realizada com um quadro igual ao quadro manual, a distinção desses processos, é que no método automático, o quadro se levanta automaticamente enquanto o tecido se desloca. Na estampagem a transfer ou silk um papel especial com a estampa é usado como intermediário para transferir a cor para o tecido por meio de pressão e calor, via sublimação. Na estampagem com quadro rotativo, um quadro cilíndrico gira em torno de seu eixo à medida que o tecido se desloca. A estampagem a rolo ou cilindro gravado é uma técnica industrial amplamente empregada, na qual cilindros de aço são gravados em relevo para aplicar a pasta de estampagem nos pontos próximos do cilindro, facilitando a transferência para o tecido (FIEMG, 2014).

2.4.3 Beneficiamento terciário

O beneficiamento terciário ou acabamento ou etapa final compreende operações aplicadas ao substrato têxtil e têm o propósito de aprimorar as características como a estabilização dimensional, toque/brilho, impermeabilização, entre outras, aperfeiçoando o aspecto do produto final e tornando-o mais atrativo para os consumidores. As operações nessa etapa podem ser conduzidas tanto de forma seca quanto úmida, bem como de maneira contínua ou em batelada (FIEMG, 2014). Esse processo envolve diversas operações.

A calandragem tem como função eliminar os vincos e proporcionar brilho ao material têxtil, esse processo é mais utilizado em tecidos malha. A etapa de amaciamento tem finalidade de propiciar um toque agradável ao tecido. O efeito "seda" é obtido através do tratamento alcalino de poliéster, proporcionando uma textura sedosa. A sanforização ou pré-encolhimento é um processo que induz o encolhimento do material têxtil por meios físicos, com o objetivo de prevenir futuros encolhimentos das peças durante a lavagem doméstica subsequente (Bastian; Rocco, 2009).

A flanelagem ou felpagem tem por finalidade conferir ao tecido uma base felpuda. O carregamento tem como objetivo deixar o tecido mais pesado. O acabamento “lave e use” permite ao tecido não amarrotar por tempo indeterminado, dispensando o uso de ferro de passar roupa. A resinagem pode ocorrer de três formas distintas, e são elas: PVC, acrílica e termofixagem, e a escolha do tipo de resinagem depende do resultado desejado (Pezzolo, 2017).

2.5 Lavanderias industriais

As lavanderias industriais operam no estágio final da produção de roupas e vestuário na operação de lavagem e beneficiamento de seus produtos, especialmente para peças feitas de algodão, jeans e brim. Elas intervêm internamente para aprimorar a qualidade e criar efeitos exclusivos nas peças acabadas, que não podem ser realizadas durante a fabricação do tecido plano (FIEMG, 2014).

As peças em tecido cru adquirem características distintas, pois podem passar por diversas fases de acabamento, incluindo amaciamento e envelhecimento. Cada item possui uma receita de lavagem específica e um procedimento de beneficiamento personalizado, com a finalidade de valorizar e estilizar o produto final. As lavanderias, em sua linha de produção, empregam principalmente dois processos convencionais: lavagem e secagem, respectivamente (FIEMG, 2014).

A lavagem é o procedimento de limpeza que faz uso de água e produtos de higiene, adaptando-se às necessidades de diferentes materiais têxteis, e pode ser realizada de forma manual ou com automação, seguindo instruções específicas para cada tipo de peça, incluindo escolha de método (seco ou úmido), produtos, concentrações, pH, intensidade mecânica e temperatura. Já a secagem é o processo de eliminação da umidade presente nas roupas, utilizando centrífugas e/ou por vaporização térmica através das secadoras. As lavanderias industriais, dessa forma, são responsáveis por descartarem grande volume de despejo líquido, caracterizados por alta coloração e contendo grande quantidade de produtos químicos (FIEMG, 2014).

2.5.1 Resíduos

Ao longo de todas as fases da produção na indústria têxtil, ocorrem interferências ambientais, principalmente na forma de efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões atmosféricas. Sem um controle e medidas adequadas de mitigação, esses fatores têm o potencial de causar impactos ambientais relacionados à atividade (FIEMG, 2014).

2.5.2 Resíduos sólidos

Na etapa de produção têxtil são realizadas várias operações que resultam na geração de resíduos sólidos, os quais podem variar em termos de características e quantidade. A quantidade de resíduos sólidos gerados nas indústrias têxteis depende de uma série de fatores, incluindo o tipo, tamanho, natureza e eficiência dos equipamentos utilizados, bem como a presença e eficácia dos sistemas de tratamento de efluentes e controle de emissões atmosféricas (FIEMG, 2014).

Os resíduos sólidos originados do processo produtivo, especialmente nas fases de fiação e tecelagem, consistem essencialmente em partes não utilizáveis da matéria-prima, como fibrilas, fibras, fitas, fios, pavios, entre outros. A quantidade de resíduos sólidos gerados durante a produção está diretamente relacionada ao consumo de matéria-prima, sendo que a etapa de fiação normalmente apresenta perdas médias de cerca de 5,0%, enquanto a etapa de tecelagem tem perdas médias de aproximadamente 15,0% (FIEMG, 2014).

Além disso, há a geração de resíduos comuns e de embalagens, sendo importante evitar a sua contaminação. Outros resíduos sólidos, com potencial impacto ambiental, resultam da queima de combustíveis nas caldeiras, como cinzas, fuligem ou escória, depende da temperatura alcançada, e a quantidade de resíduos está diretamente relacionada ao tipo de combustível utilizado. É relevante destacar que o elevado volume de efluentes líquidos industriais também contribui para um impacto ambiental significativo, especialmente devido à formação de lodo nas estações de tratamento de efluentes (ETE), cuja produção é consideravelmente elevada (FIEMG, 2014).

2.5.3 Resíduos gasosos

As caldeiras desempenham um papel central nas emissões atmosféricas das indústrias têxteis, e os solventes orgânicos também têm um impacto significativo nas emissões. As emissões estão diretamente relacionadas ao tipo de combustível queimado, podendo resultar na liberação de gases e/ou material particulado. Entre os combustíveis mais comuns utilizados pelas empresas têxteis, destacam-se a lenha e o óleo de baixo ponto de fluidez, embora haja variações na fonte de abastecimento das caldeiras, incluindo o uso de biomassa, gás liquefeito de petróleo ou óleo xisto (FIEMG, 2014).

O material particulado é predominantemente originado durante a operação das caldeiras que queimam lenha ou óleo combustível, manifestando-se na forma de cinzas e fuligem. Quanto aos gases, incluem-se o dióxido de enxofre, os óxidos de nitrogênio e o monóxido de carbono (Leão *et al.*, 2002).

Os principais equipamentos utilizados para controlar as emissões em caldeiras que queimam lenha como combustível são os ciclones e os filtros. Por outro lado, quando se trata de caldeiras que utilizam óleo como combustível, é comum empregar sistemas de lavagem de gases. Para um controle abrangente, abarcando tanto partículas quanto gases emitidos, é recomendado o uso de precipitadores eletrostáticos (FIEMG, 2014).

É fundamental destacar a importância da manutenção regular dos sistemas de controle, a fim de assegurar que operem em conformidade com os padrões regulamentares. Além disso, o gerenciamento adequado da quantidade de ar na combustão é essencial, pois o excesso ou a escassez podem resultar em ineficiência e emissões indesejadas (FIEMG, 2014).

2.5.4 Resíduos líquidos

A indústria têxtil é uma das principais fontes de efluentes líquidos, com 88,0% desse volume sendo liberado como esgoto industrial, enquanto os restantes 12,0% são perdidos devido à evaporação (Leão *et al.*, 2002). A composição dos efluentes líquidos varia de acordo com os processos industriais, tipos de fibras e produtos químicos utilizados. O alto consumo de água resulta das atividades de lavagem, beneficiamento e limpeza das instalações (FIEMG, 2014).

Os efluentes da indústria têxtil, especialmente do beneficiamento, contêm uma variedade de substâncias contaminantes, incluindo produtos químicos, que representam risco ambiental (FIEMG, 2014). Efluentes têxteis são geralmente tóxicos e não biodegradáveis devido à concentração de substâncias orgânicas, corantes, surfactantes e aditivos (Rubinger, 2009).

Em relação a esse segmento, o principal problema encontra-se no setor de tingimento. As fibras têxteis requerem corantes com características específicas e claramente definidas, que engloba alta afinidade, coloração uniforme, resistência à descoloração e ao mesmo tempo devem ser economicamente viáveis (Wesenberg *et al.*, 2003).

Os efluentes provenientes das atividades industriais têxteis exibem elevados valores de pH, temperatura, demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos totais e cor (Braile, Cavalcanti; 1993). Além disso, esses efluentes são turvos e possuem um odor forte. A descarga de efluentes industriais não tratados lançados diretamente em corpos d'água pode reduzir significativamente os níveis de oxigênio dissolvido (OD) na água (Ilyas *et al.*, 2019).

Apesar de que a maior parte dos corantes apresente baixa DQO, eles contribuem para o aporte de carbono orgânico e cor nas águas. A DBO em efluentes de tingimento geralmente varia na faixa de 200 mg/L a 3.000 mg/L, enquanto a DQO varia entre 500 mg/L e 5.000 mg/L. Os sólidos suspensos, por sua vez, costumam situar-se entre 50 mg/L e 500 mg/L, e o pH varia de 4 a 12 (Leão *et al.*, 2002).

Para minimizar os potenciais impactos ambientais, os efluentes líquidos gerados devem ser submetidos a tratamento prévio antes de serem descartados. Esse tratamento visa reduzir as concentrações de contaminantes a níveis que estejam em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação ambiental, garantindo, assim, a qualidade do corpo d'água receptor. O tipo de sistema de tratamento utilizado nas estações de tratamento de efluentes pode variar consideravelmente, principalmente em função do tipo de atividade realizada na instalação (FIEMG, 2014). Os processos mais utilizados para descolorir as águas residuárias têxteis são: adsorção, coagulação/floculação, filtração, fotodegradação e extração por solvente (Barbosa *et al.*, 2020), outros métodos que também são utilizados incluem: precipitação, oxidação/redução, troca iônica e processo de separação por membrana (Mathivanan *et al.*, 2021).

2.6 Boas práticas ambientais na indústria têxtil

A busca pela sustentabilidade, a adoção de regulamentações ambientais mais rigorosas e a crescente concorrência no mercado tem motivado muitas empresas a adotarem práticas de melhoria contínua. O aprimoramento do desempenho ambiental da indústria envolve a substituição de atividades cotidianas por práticas que promovam a produção sustentável, incluindo medidas relacionadas à limpeza, organização, otimização de tempos de produção, saúde, segurança e redução do potencial poluidor, entre outras (Bastian; Rocco, 2009). Essas práticas resultam em uma série de benefícios, tanto ambientais quanto econômicos, na gestão de processos (FIEMG, 2014).

Algumas boas práticas ambientais aplicáveis ao setor industrial incluem: redução, recuperação e reutilização da água; redução e conservação de energia; uso de lavagem a seco; controle de emissões odoríferas e de ruído e vibração; recuperação de insumos; gestão de resíduos com ênfase na redução, reutilização e reciclagem; alteração de equipamentos; redução da geração de substâncias atmosféricas; armazenamento adequado de produtos perigosos; além de medidas para o controle, substituição, recuperação, redução e eliminação de produtos químicos (Bastian; Rocco, 2009).

A implementação desses processos resulta em diversos benefícios ambientais e econômicos, incluindo a redução do consumo de recursos naturais, economia de água potável, otimização dos processos de tratamento de efluentes, aumento da rentabilidade do negócio, redução de custos de produção e melhoria do relacionamento com a comunidade e com os órgãos públicos (FIEMG, 2014), bem como a diminuição do consumo de combustíveis, redução de vibrações, uso mais eficiente de produtos químicos, minimização de resíduos, diminuição do volume de lodo gerado, redução de emissões de gases poluentes e prevenção de acidentes (Bastian; Rocco, 2009).

2.6.1 Legislações ambientais pertinentes

As principais normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas são: a ABNT NBR 9800/1987 que estabelece “Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário” e a ABNT NBR

13402/1995 que faz a “Caracterização de cargas poluidoras em efluentes líquidos industriais e domésticos” (ABNT; 1987, 1995).

No âmbito nacional a Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011 que “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”. Os parâmetros estabelecidos por esta resolução são pH, temperatura, óleos e graxas, materiais sedimentáveis e DBO (Brasil, 2011). A Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, os efluentes lançados no corpo hídrico não devem alterar a sua classe (Brasil, 2005). E a principal legislação do estado de Minas Gerais, é a Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8, de 21 de novembro de 2022, que “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, e dá outras providências” (Minas Gerais, 2022).

Os efluentes de qualquer fonte poluidora podem ser lançados de forma direta no corpo receptor, desde que siga os padrões definidos na Resolução CONAMA nº 430/2011 e na Deliberação Normativa COPAM-CERH nº 8, os valores padrões estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores padrão de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora

Parâmetro	CONAMA nº 430/2011 - Art. 16	COPAM-CERH nº8 - Art. 32
pH	5,0 – 9,0	Entre 5,0 - 9,0
Temperatura	Inferior a 40°C	Inferior a 40°C
Materiais sedimentáveis	Até 1 mL/L	Até 1 mL/L
Óleos e graxas	Até 20 mg/L (óleo mineral)	Até 20 mg/L (óleo mineral)
	Até 50 mg/L (óleos vegetais e gorduras animais)	Até 50 mg/L (óleos vegetais e gorduras animais)
Materiais flutuantes	Ausentes	Ausentes
DBO	Remoção mínima de 60,0%	Até 60 mg/L ou eficiência de redução de no mínimo 85,0% e média anual igual ou superior a 90,0%
		Até 180 mg/L ou, se tratar de efluentes de indústria têxtil, o padrão será de 250 mg/L
DQO	Não especificado	Não especificado
Cor	Não especificado	Não especificado
Sólidos em suspensão	Não especificado	Até 100 mg/L

Fonte: adaptado de Brasil (2011) e Minas Gerais (2021).

3 EFLUENTES INDUSTRIAIS

Os efluentes industriais são os resíduos líquidos que são gerados durante o processo industrial e depois descartados. Estes resíduos são caracterizados pela concentração de elementos químicos e contaminantes, que variam de acordo com o segmento da indústria. A falta de tratamento destes resíduos ou até mesmo a ineficiência deste pode causar muitos prejuízos para o meio ambiente, causando poluição e contaminação do solo e da água, o que também se torna prejudicial para a população.

É de responsabilidade da empresa que gera o resíduo o seu armazenamento, transporte e descarte correto. A legislação brasileira é muito rigorosa com as indústrias quanto à responsabilidade ambiental e tratamento de seus efluentes. O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), é o órgão responsável por regularizar os processos realizados pelas empresas que possam causar danos ao meio ambiente, sendo que o despejo de efluentes deve estar de acordo com a resolução nº 430/2011. O não cumprimento das resoluções vigentes pode ser considerado crime ambiental, acarretando severas punições para a empresa. A preocupação com o meio ambiente está sendo cada vez mais priorizada nas indústrias, que buscam diminuir os seus impactos ambientais. Assim, a forma como é feito o descarte dos efluentes industriais merece a atenção das empresas.

3.1 Classificação dos métodos de tratamento de efluentes

Os constituintes encontrados no efluente são removidos por meio físicos, químicos e biológicos. Os métodos individuais são, usualmente, classificados como processos unitários físicos, químicos ou biológicos. Embora esses processos ocorram em combinações diversas em sistemas de tratamento, foi considerado vantajoso estudar suas bases científicas separadamente, uma vez que os princípios envolvidos não são alterados.

Processos unitários físicos: Esses processos removem os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes através de separações físicas. São utilizados métodos como decantação, gradação, peneiração, filtração, entre outros. Também

existem procedimentos específicos como aplicação de radiação e luz ultravioleta para a destruição das partículas contaminantes.

Processos unitários químicos: Esses processos removem os compostos tóxicos por reações químicas, os principais processos utilizados são precipitação, desinfecção, transferências de gases e adsorção. Na precipitação química, é realizado pela produção de um precipitado químico que pode ser removido por sedimentação, filtração ou por processos de membranas. A adição de oxigênio à água para manter reações aeróbicas é o exemplo mais comum de transferência de gases. Outro processo unitário químico é a utilização de cloro para desinfecção do efluente.

Processos unitários biológicos: Esses processos removem substâncias orgânicas biodegradáveis, coloidais ou dissolvidas encontradas no efluentes. Basicamente essas substâncias são convertidas em gases que possam escapar para a atmosfera e tecido celular biológico que pode ser removido por sedimentação ou por qualquer outro processo de separação. O tratamento biológico é também utilizado para remover nitrogênio e fósforo do efluente.

De acordo com Giordano (2004), os níveis de tratamento e suas aplicações podem ser apresentadas da seguinte forma:

Tratamento preliminar: Têm por objetivo a remoção de sólidos grosseiros (areia, terra, pó de pedra e similares), em caixas de área; a remoção de sólidos com diâmetro superior a 1mm em processos subsequentes como: peneiras; sólidos com diâmetro superior a 10 mm utilizando-se a implantação de grades para retenção dos mesmos.

O autor ainda menciona que a etapa preliminar também pode remover óleos e graxas, por diferença de densidade, em separadores de água e óleo.

Tratamento primário: Visa à remoção de sólidos sedimentáveis, através de sedimentadores ou flutuadores, ou pela associação de coagulação e floculação química para a remoção de matéria orgânica coloidal ou óleos e gorduras.

Tratamento secundário: Compreende os processos de remoção da matéria orgânica biodegradável dissolvida ou coloidal, possibilitando ainda a remoção de nutrientes como nitrogênio e/ou fósforo. Esta etapa envolve processos biológicos como: lodo ativado, lagoas de estabilização e filtro biológico.

Tratamento Terciário: Remoção de sólidos suspensos residuais (após tratamento secundário), usualmente por filtros granulares. A desinfecção é, também,

um componente típico do tratamento terciário. Remoção de nutrientes é, geralmente, incluído nesta definição.

3.2 Tratamento de Efluente de Lodos Ativados Convencionais (CAS)

Todo tratamento visa a remoção de impurezas físicas, químicas, biológicas e organismos patogênicos dos efluentes para posterior lançamento nos cursos d'água. Para conseguir um tratamento satisfatório é necessário conhecimento prévio das cargas poluentes e os tipos de contaminantes presentes em cada tipo de efluente.

O efluente contém diversos materiais sólidos, variando de sólidos grosseiros a material coloidal, na caracterização do efluente, geralmente os materiais grosseiros são removidos antes que as amostras sejam analisadas para sólidos.

Os testes de sólidos suspensos totais (SST) são frequentemente utilizados para avaliar o desempenho de processos convencionais de tratamento. O teste de SST é um dos dois padrões de efluentes universalmente utilizados junto com a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) pelos quais os desempenhos de sistema de tratamento são avaliados para finalidades de controle (Metcalf e Eddy, 2016).

A turbidez é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar a massa líquida, devido a presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas como areia, argila, detritos inorgânicos tais como algas e bactérias (Hach, 1997).

A cor de uma amostra de água está associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido a presença de sólidos dissolvidos, principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico. Os esgotos domésticos se caracterizam por apresentarem predominantemente matéria orgânica em estado coloidal e os efluentes têxteis que contém anilinas, lignina e celulose. Alguns outros metais presentes em efluentes industriais conferem cor, mas, em geral, íons pouco dissolvidos interferem na passagem de luz, o problema maior de cor na água é, em geral, o estético, já que causa um efeito negativo na população (Metcalf e Eddy, 2016).

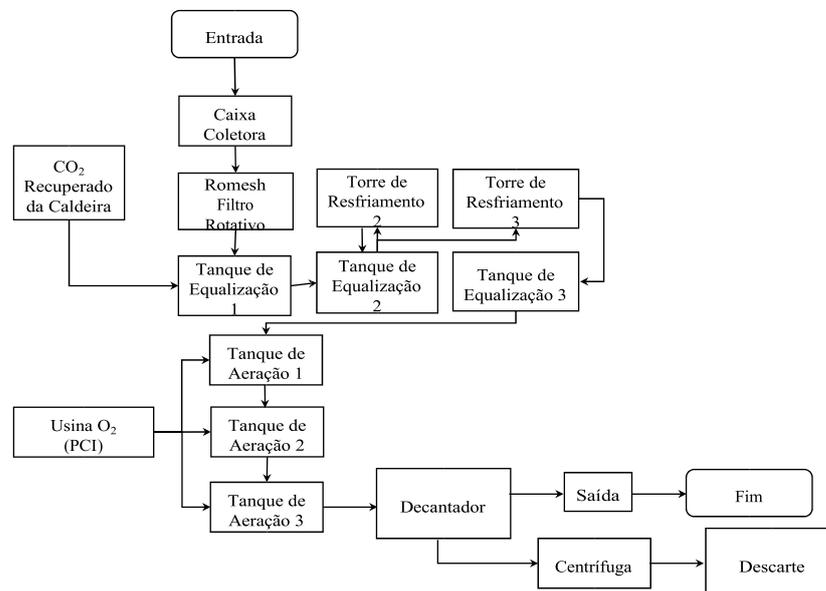
A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia a uma forma inorgânica estável. Corresponde a quantidade de oxigênio consumido na degradação da matéria orgânica biodegradável por processos biológicos.

Constituem condições básicas para a DBO₅ (de cinco dias): existência de microorganismos aeróbios, existência de condições aeróbias (oxigênio dissolvido), existência de compostos assimiláveis (elementos orgânicos biodegradáveis). É um parâmetro importante no dimensionamento de uma estação de tratamento de efluentes (Metcalf e Eddy, 2016).

A demanda química de oxigênio (DQO) é um parâmetro global usado como indicador de conteúdo orgânico de águas residuárias e superficiais, muito utilizado no monitoramento de estações de tratamento de efluentes. Diz respeito à quantidade de oxigênio consumido por substâncias orgânicas e minerais, que se oxidam sob condições definidas, podendo se dimensionar a quantidade de matéria orgânica no início do processo e após a passagem do efluente pela estação e calcular a eficiência do sistema.

A Figura 2 demonstra uma estação de tratamento de efluente de lodo ativado convencional (CAS).

Figura 2 - Fluxograma do tratamento de efluente de lodo ativado convencional CAS



Fonte: arquivo da autora

A entrada do efluente no sistema é proveniente do descarte dos processos têxteis.

A caixa coletora tem a função de receber o efluente industrial e dela seguir para o tratamento passando pelo equipamento de microfiltração Romesh.

O Romesh é uma peneira rotativa de microfiltração para remoção de sólidos finos proveniente do efluente industrial da caixa coletora. A abertura da tela é de 0,2 mm, a peneira rotativa Romesh consiste em uma tela cilíndrica em movimento rotacional, pela qual o efluente bombeado passará e seguirá por gravidade até o tanque de equalização. Os sólidos removidos seguirão por gravidade para a caçamba para posterior descarte.

Tanque de equalização: o efluente proveniente do Romesh passará por uma calha Parshall e cairá no tanque de equalização, onde ocorrerá a correção do pH que será realizada pela injeção de gás proveniente da combustão das caldeiras rico em CO₂.

Depois de equalizado e homogeneizado, o efluente será encaminhado através de bombas para as torres de resfriamento, em seguida o efluente será bombeado para os tanques de aeração ou reatores biológicos.

O efluente industrial provenientes dos tanques de equalização chegará através do bombeamento com a vazão equalizada e o pH ajustado entre 6,5 a 8,5 com temperatura de até 40°C.

A aeração é realizada com a injeção de oxigênio através de aeradores tipo ISO, a injeção de O₂ é garantida pela estação geradora de O₂ PCI modelo DOCS DUAL 5000, em seguida o efluente será encaminhado por gravidade para o decantador onde será dosado produtos químicos para a formação do lodo.

Com a decantação do efluente o sobrenadante é bombeado para o emissário onde será descartado no corpo d'água, e o lodo seguirá para centrífuga para ser retirado através de caçamba e levado para o descarte.

3.3 Processos de separação por membranas

A filtração envolve a separação (remoção) de material particulado ou coloidal de um líquido. Nos processos de separação por membranas, além de partículas e colóides, também é possível remover moléculas orgânicas e íons dissolvidos. As membranas funcionam como uma barreira seletiva que permite a passagem de certos constituintes presentes na água enquanto retém outros (Olivier *et al.*, 2002, 2003). A Figura 3 apresenta o VRM dentro da câmara de filtração.

Figura 3 - VRM na câmara de filtração vazia



Fonte: autoria própria

3.3.1 Terminologia utilizada nos processos de separação por membranas

Os termos comumente utilizados no campo das tecnologias de separação por membranas incluem: alimentação, permeado e concentrado. A corrente afluyente aos sistemas de separação por membranas para tratamento é conhecida como alimentação. A parcela da corrente de alimentação que atravessa a membrana é conhecida como permeado, e a fração da alimentação que não passou através da membrana é o concentrado, também denominado rejeito. O fluxo, relação entre a vazão de permeado e a área total da membrana, expresso em $L/m^2 \cdot h$ ou $L/m^2 \cdot d$, é a principal variável para a avaliação do desempenho da membrana. O fluxo é equivalente ao conceito de taxa de aplicação utilizado para os processos de filtração (Olivier *et al.*, 2002, 2003).

3.3.2 Classificação dos processos de separação por membranas

Os processos de separação por membranas incluem a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF), a nanofiltração (NF), a osmose reversa (OR) e a eletrodialise (ED). Os processos de separação por membranas também podem ser classificados com base em outros critérios, como: configuração da membrana, material da membrana, natureza da força motriz aplicada, mecanismo de separação e capacidade de separação de contaminantes. Os processos de separação que utilizam a pressão hidráulica como força motriz são divididos em duas categorias: os de baixa pressão,

que incluem a MF e UF, e os de alta pressão, que incluem a NF e a OR (Metcalf e Eddy, 2016).

3.3.3 Configuração das membranas

Na área da tecnologia de separação por membranas, o termo módulo é utilizado para descrever uma unidade que inclui as membranas, a estrutura de confinamento da membrana e o vaso de pressão, com os dispositivos de entrada e saída das correntes envolvidas. Os principais tipos de módulos utilizados em tratamento de água e efluentes incluem: tubular, fibra oca e enrolada em espiral. Módulos de placas planas e cartuchos plissados também estão disponíveis, mas são mais utilizados em processos industriais.

Existem dois padrões básicos de escoamento nas membranas: de fora para dentro e de dentro para fora. Em muitas aplicações para tratamento de efluentes nas quais são utilizadas membranas de fibra oca ou placa plana, o fluxo é de fora para dentro. Com esse padrão de escoamento, as membranas podem ser contralavadas com ar, água ou a combinação dos dois. O padrão de escoamento de fora para dentro também é utilizado quando a concentração de SST na alimentação é elevada (Riess *et al.*, 2001).

3.3.4 Materiais das membranas

Muitas membranas comerciais são produzidas na forma tubular, fibra oca ou de placas planas. Em geral, três tipos de membranas são produzidos: simétricas, assimétricas e de filme fino composto. Nas membranas simétricas, a estrutura interna é uniforme por toda extensão da membrana, que pode ser porosa ou não porosa. As membranas assimétricas, são produzidas pelo processo de inversão de fases e consistem de uma camada superior muito fina ($< 1 \mu\text{m}$) e uma camada porosa de maior espessura (até $100 \mu\text{m}$), que serve de suporte e apresenta alta capacidade de fluxo. Na prática, as membranas assimétricas, os poros internos apresentam-se na forma de canais, com diâmetro crescente da superfície para a base da membrana.

As membranas compostas são feitas a partir da aplicação de uma camada fina de celulose, poliamida ou outra camada ativa ($0,15$ a $0,25 \mu\text{m}$ de espessura) sobre

um substrato poroso para dar estabilidade à membrana. As membranas utilizadas para tratamento de efluentes são feitas com materiais poliméricos, embora membranas cerâmicas também sejam utilizadas (Metcalf e Eddy, 2016).

A Tabela 2 mostra as características dos processos de separação por membranas.

Tabela 2 - Características gerais dos processos de separação por membranas

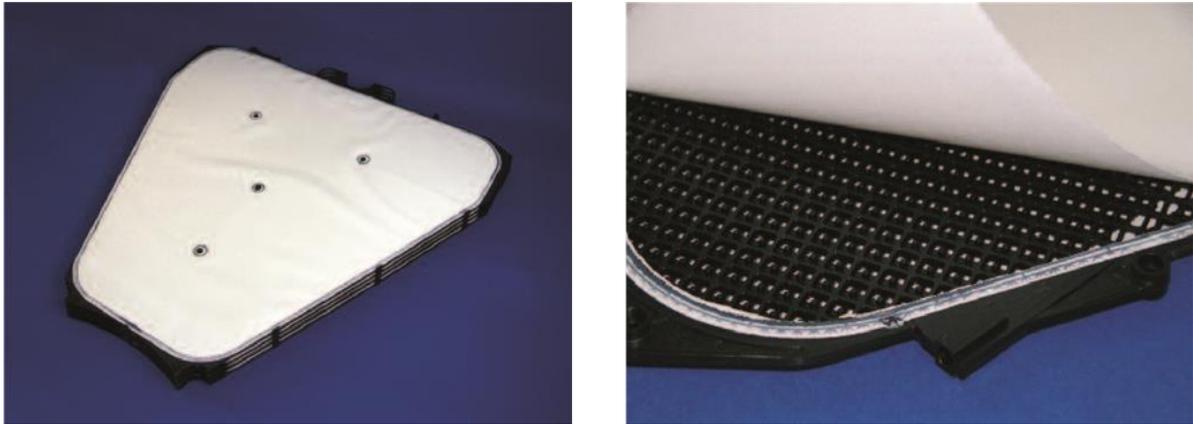
Processo de separação	Faixa de Variação (μm)	Materiais	Configuração
Microfiltração	0,07-2,0	Acrinolitrla, cerâmica, polipropileno, polissulfona, politetrafluoretileno, fluoreto de polivinilideno, nailon Poliamida, cerâmica, acetato de celulose,	Enrolado em espiral, fibra oca, placa plana
Ultrafiltração	0,008-0,2	polipropileno, polissulfona, fluoreto de polivinilideno, teflon	Enrolado em espiral, fibra oca, placa plana
Nanofiltração	0,0009-0,01	Celulose, poliamida, polissulfona, fluoreto de polivinilideno, filme fino composto	Enrolado em espiral, fibra oca
Osiose reversa	0,0001-0,002	Celulose, poliamida, filme fino composto	Enrolado em espiral, placa plana
Eletrodiálise	0,0003-0,002	Mesmo material das resinas de troca iônica	Placas planas

Fonte: (Metcalf e Eddy, (2016).

3.3.5 Descrição das membranas de placas planas

Os módulos de placa plana são constituídos de uma série de membranas planas e placas de suporte. A água a ser tratada passa entre as membranas de duas placas adjacentes. As placas suportam as membranas e apresentam canais internas para permitir o escoamento do permeado para fora da unidade. Geralmente, as dimensões de uma placa individual são de 20 nm por 40 mm. As densidades de empacotamento dos módulos de placa plana variam entre 100 e 400 m^2/m^3 . A Figura 4 apresenta um módulo de quatro membranas placa plana do VRM (Vacuum Rotational Membranes).

Figura 4 - Módulo da membrana de placa plana do VRM



Fonte: Huber Technology (2012)

3.3.6 Aplicação e desempenho dos processos de separação por membranas

Com o aumento da preocupação com a saúde pública e o desenvolvimento de novas membranas de menor custo, a aplicação da tecnologia de separação por membrana na área de engenharia ambiental aumentou de forma significativa nos últimos cinco anos. Espera-se que as aplicações da tecnologia de separação por membrana continuem a aumentar no futuro (Metcalf e Eddy, 2016).

Microfiltração: A utilização de membranas de microfiltração para tratamento biológico de efluentes é, na atualidade, uma das principais aplicações da tecnologia de separação por membranas para o tratamento de efluentes. No tratamento de efluentes, a microfiltração tem sido mais utilizada para substituição de filtros granulares para remoção de sólidos em suspensão residuais, reduzindo a turbidez e a concentração de micro-organismos do efluente tratado para possibilitar uma desinfecção eficaz e como pré-tratamento para sistema de OR.

Ultrafiltração: As membranas ou sistemas de Ultrafiltração são utilizados para muitas das aplicações nas quais a utiliza a MF. Além disso, membranas de UF com maior capacidade de separação são utilizadas para remoção de substâncias orgânicas dissolvidas com massa molecular elevada, como matéria orgânica natural, proteínas, carboidratos e outros compostos orgânicos. As membranas de UF não removem açúcares ou sais dissolvidos. Outra diferença relevante entre as membranas de MF e UF é que as membranas de MF não são capazes de remover vírus.

Nanofiltração: A Nanofiltração, também conhecida como OR de baixa pressão, pode rejeitar substâncias com diâmetro de até 0,001 μm , incluindo moléculas orgânicas com baixa massa molar e íons bivalentes. Por essa razão, a NF é a membrana preferida para abrandamento de água. As vantagens da NF em relação ao abrandamento com cal incluem a produção de uma água que atende aos requisitos mais restritivos para diversas aplicações e o fato de não ser necessária a dosagem de produtos químicos e de não ocorrer a geração de lodo. Como tanto os constituintes orgânicos quanto os inorgânicos, além de bactérias e vírus, são removidos, a necessidade de desinfecção é minimizada (Metcalf e Eddy, 2016).

Osrose reversa: Em todo o mundo a osrose reversa é, principalmente, utilizada para a dessalinização (Voutchkov, 2013). No tratamento de efluentes, os sistemas de OR são utilizados para a remoção de contaminantes dissolvidos presentes nos efluentes após o tratamento preliminar por filtração em meio granular ou microfiltração, por exemplo. As membranas de OR são capazes de excluir íons, mas o sistema exige pressões elevadas para a produção de água.

3.3.7 Tratamento de efluente pelo processo de membrana

O sistema MBR (Membrane Bio Reactor), também denominado VRM (Vacuum Rotational Membranes) nos permite operar com SST (sólidos suspensos totais) elevado, se necessário até 20.000 mg/L, sem que ocorra perda de sólidos.

A separação de sólidos não é gravitacional como ocorre no sistema convencional de lodo ativado, mas sim por ultrafiltração. A Figura 5 demonstra as câmaras de filtração do VRM.

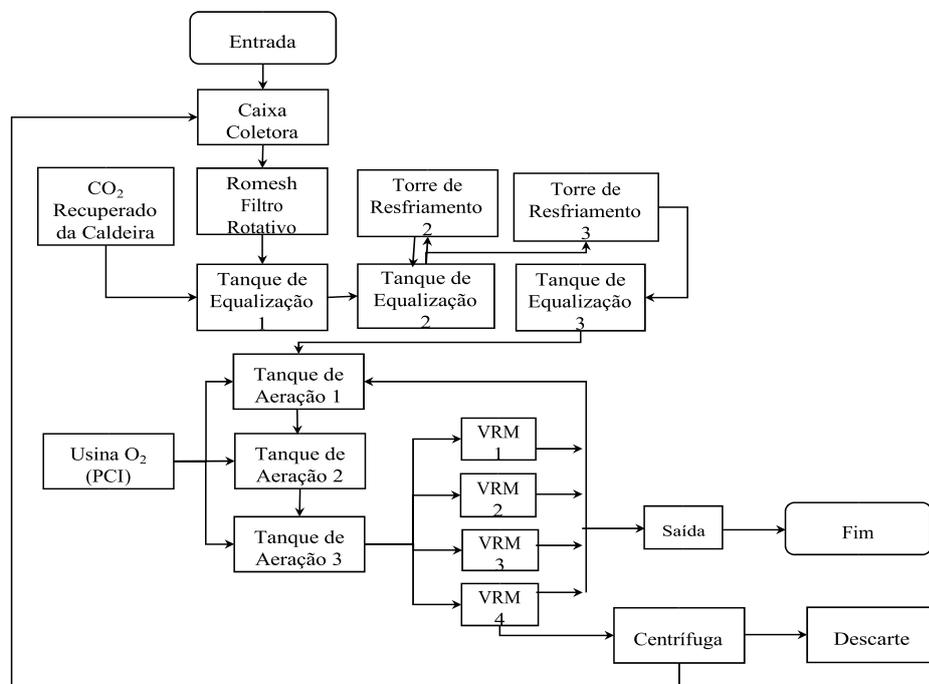
Figura 5 - Câmara de filtração do VRM com efluente



Fonte: autoria própria

A Figura 6 mostra o sistema de tratamento de efluente pelo processo de membrana.

Figura 6 - Tratamento de efluente pelo processo de membrana VRM



Fonte: arquivo da autora

O sistema de ultrafiltração VRM se consiste na filtração do lodo biológico pelas membranas que ficarão submersas no meio líquido dentro das câmaras de filtração.

A filtração será realizada por meio de sucção, ocorrendo assim a separação dos sólidos presentes na mistura líquida.

O efluente tratado, chamado de permeado, sai com a carga orgânica reduzida e por ter passado por uma barreira física que promove a desinfecção, o mesmo já deixa o tratamento com elevado potencial de reuso.

O lodo biológico do tanque de aeração será encaminhado por gravidade para as câmaras de filtração onde estarão os módulos das membranas. A vazão de efluente tratado será de 27,5 m³/h para cada módulo de membrana, um medidor de vazão magnético faz a aferição da vazão do permeado.

Um soprador de ar para cada unidade de ultrafiltração fornecerá ar para a remoção de sólidos das paredes das membranas através de bolhas grossas, a vazão de ar será de até 720 m³/h.

As câmaras de filtração são providas de controladores de nível tipo onda guiada que farão o controle do nível para proteção do sistema VRM.

O efluente tratado seguirá para os tanques de armazenamento de permeado.

O descarte do lodo será realizado das câmaras de filtração para os tanques de aeração, através de bombas centrífugas submersas em cada câmara.

4 RESULTADOS ENTRE OS SISTEMAS DE LODO ATIVADO CONVENCIONAL (CAS) E PELO PROCESSO DE MEMBRANA (VRM)

Foram realizados testes nos dois sistemas com as mesmas amostras para comparação de resultados das análises de DQO, DBO₅, Cor e Turbidez para avaliar a eficiência dos sistemas.

A tabela 3 demonstra os resultados dos testes realizados em quinze dias para confronto entre os valores obtidos pelos sistemas CAS e VRM.

Tabela 3 - Resultados entre os sistemas CAS e VRM

Entrada	DQO (mg/L)		DBO ₅ (mg/L)		Entrada	Cor (mgPtCO/L)		Turbidez (NTU)	
	Saída CAS	Saída VRM	Saída CAS	Saída VRM		Saída CAS	Saída VRM	Saída CAS	Saída VRM
2125	482	191	124	30	1235	759	287	13,8	0,34
2660	434	275	124	30	1025	855	307	32,6	0,35
3250	356	232	124	30	1340	948	322	40,3	0,35
2460	454	267	124	30	1130	842	304	35,0	0,34
2150	385	250	124	30	1064	1280	290	27,4	0,31
2890	328	197	128	26	1434	1202	325	26,8	0,32
2925	369	224	128	26	1372	1360	334	30,1	0,33
2485	338	159	128	26	884	680	266	14,3	0,30
3820	345	155	128	26	1128	1016	230	25,7	0,31
2505	393	225	128	26	1256	792	335	16,1	0,32
2500	404	142	92	18	821	1970	330	54,6	0,32
2950	400	188	92	18	616	1988	318	59,2	0,33
2080	409	84	92	18	1308	1952	345	57,4	0,31
2155	497	231	92	18	1920	1084	246	39,3	0,35
1925	452	187	92	18	1648	1112	212	36,5	0,33

Fonte: autoria própria

A DQO é a medida da quantidade de oxigênio necessária para oxidação química de compostos orgânicos e inorgânicos no efluente. Essa análise é muito importante em uma estação de tratamento de efluentes, com os valores obtidos podemos ter noção da carga orgânica e inorgânica que entra no sistema, e calcular a eficiência do tratamento com o efluente tratado na saída, obtendo a porcentagem de remoção dessa carga no sistema.

O sistema CAS obteve 83,7% de eficiência no tratamento durante quinze dias como mostra a Equação 1:

1 - Porcentagem de eficiência da estação de tratamento

$$\text{DQO}_{(\text{bruto})} - \text{DQO}_{(\text{tratado})} \times 100 / \text{DQO}_{(\text{bruto})} = \% \text{ de eficiência da estação.}$$

O sistema VRM obteve 91,1% de eficiência no tratamento durante os quinze dias de testes.

A DBO indica a quantidade de oxigênio que os microorganismos consomem para decompor a matéria orgânica no efluente. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos pelo sistema CAS a menor DBO cinco dias foi de 92 mg/L em quanto o sistema VRM a menor DBO cinco dias foi de 18 mg/L.

Conforme a legislação CONAMA 430/2011 Art. 18 decreto 8.468, a DBO cinco dias a 20°C tem que ser de no máximo 60 mg/L.

A Cor é uma análise muito importante quando se trata de efluente têxtil tratado. O resíduo têxtil, geralmente contem alta intensidade de cor, por se utilizar muitos corantes durante a produção.

A Tabela 3 compara os resultados de cor dos sistemas CAS e VRM, observa-se que durante os quinze dias de testes o sistema CAS obteve uma média de 1189 mgPtCo/L e o sistema VRM obteve em média 297 mgPtCo/L. A legislação não especifica parâmetros para cor, porém o maior problema da cor é em geral o estético, já que tem um efeito negativo na população.

A Turbidez indica a presença de partículas suspensas, como corantes, resíduos de fibras e outros materiais, que podem comprometer a qualidade da água. A turbidez elevada pode ser um sinal de perda de sólidos e presença de patógenos no efluente.

Conforme a Tabela 3 demonstra, o sistema CAS obteve em média uma turbidez de 34 NTU, já o sistema VRM obteve em média uma turbidez de 0,30 NTU.

Os efluentes tratados do VRM apresentaram resultados em nível de excelência, comparado ao sistema de lodo ativado convencional CAS.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho destacou a eficácia dos processos de membrana no tratamento de efluentes têxteis, evidenciando sua superioridade em relação aos métodos convencionais, como o sistema de lodo ativado. Através de uma análise detalhada, foi possível demonstrar que o uso de tecnologias de membrana, proporciona uma remoção mais eficiente de contaminantes, incluindo a redução significativa da demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) turbidez e cor dos efluentes.

Os resultados obtidos confirmam que os processos de membrana não apenas atendem, mas superam os padrões regulatórios estabelecidos para o descarte de efluentes, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais associados à indústria têxtil. Além disso, a capacidade dessas tecnologias de promover o reuso da água representa um avanço significativo na conservação dos recursos hídricos, um aspecto crucial em um cenário de crescente escassez de água.

Outro ponto positivo do trabalho foi a análise comparativa entre os sistemas de tratamento, que reforçou a viabilidade econômica e ambiental da implementação de processos de membrana em larga escala. A adoção dessas tecnologias pode resultar em uma redução dos custos operacionais a longo prazo, além de melhorar a imagem ambiental das empresas, alinhando-se às demandas por práticas industriais mais sustentáveis.

Em suma, este estudo contribui para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis para o tratamento de efluentes na indústria têxtil, oferecendo um caminho viável para a redução dos impactos ambientais e a promoção de um desenvolvimento industrial responsável. A implementação dessas tecnologias pode servir como um modelo para outras indústrias, incentivando a adoção de práticas que conciliem crescimento econômico e sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABIT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Perfil do Setor**. 2023. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- ABIT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Perfil do Setor**. 2023. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13402**. Caracterização de cargas poluidoras em efluentes líquidos industriais e domésticos. Rio de Janeiro, p. 7, 1995.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9800**. Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, p. 3, 1987.
- ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. **A química do processamento têxtil**. Química Nova, v. 19, n. 3, p. 320-330, 1996.
- BARBOSA, A. A. *et al.* Adsorption of remazol golden yellow dye from aqueous solution by acerola core: kinetic and equilibrium studies. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 43, p. 1-29, Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x64900>. Acesso em: 4 fev. 2025.
- BASTIAN, E. Y. O.; ROCCO, J. L. S. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil - Série P+L**. São Paulo: CETESB: SINDITÊXTIL, 2009.
- BELTRAME, L. T. C. **Caracterização de efluente têxtil e proposta de tratamento**. 2000. p. 161. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. 18 ed. São Paulo: CETESB, 1993.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. 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, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em: 2 fev. 2025.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. 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. Diário Oficial da União, Brasília, 2011. Disponível

em:<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0430-130511.PDF>. Acesso em: 2 fev. 2025.

FIEMG - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. Minas Gerais, 2014.

FURLAN, F. R. **Avaliação da Eficiência do Processo de Coagulação-Floculação e Adsorção no Tratamento de Efluentes têxteis**. 2008. p.151. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GIORDANO, E. D. V. *et al.* A new alternative and efficient low-cost process for the removal of reactive dyes in textile wastewater by using soybean hull as adsorbent. **Water, Air, & Soil Pollution**, [S.L.], v. 232, n. 5, p. 1-25. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-021-05085-4>. Acesso em: 28 jan. 2025.

GIORDANO; G., **Tratamento e Controle de Efluentes Industriais**. Disponível em:[file:///C:/Users/Positivo/Downloads/Apostila++Tratamento+de+efluentes+industriais%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Positivo/Downloads/Apostila++Tratamento+de+efluentes+industriais%20(1).pdf). Acesso em 27 jan. 2025.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. **Corantes têxteis**. Química Nova, Araraquara, p.71-78, 2000.

Hach. Livro de Análise de Água Hach, 3. Ed. Loveland, CO, 1997.

Huber Technology. Disponível em: <https://www.huber-technology.com.br/br/produtos.html>. Acesso em: 5 fev. 2025.

IEMI - INTELIGÊNCIA DE MERCADO. **Brasil Têxtil 2022**: Relatório Setorial. Brasil. 2022.

ILYAS, M.; AHMAD, W.; KHAN, H.; YOUSAF, S.; YASIR, M.; KHAN, A. Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review. **Reviews On Environmental Health**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 171-186. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/reveh-2018-0078>. Acesso 26 jan. 2025.

LEÃO, M. D. *et al.* **Controle ambiental na indústria têxtil**: acabamento de malhas. 1. ed. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente. Segrac Editora e Gráfica Ltda, 2002.

Lei Federal nº 6.93, de 31 de agosto de 1981; **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências**. Disponível

em:http://www.bvambientebf.uerj.br/arquivos/edu_ambiental/popups/lei_federal.html. Acesso em 30 jan. 2025.

MATHIVANAN, M. *et al.* Ipomoea carnea: a novel biosorbent for the removal of methylene blue (mb) from aqueous dye solution. **International Journal Of Phytoremediation**, [S.L.], v. 23, n. 9, p. 982-1000. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2020.1871322>. Acesso em: 4 fev. 2025.

METCALF, L; EDDY, P,H. **Tratamento de efluentes e Recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2016.

MIERZWA, J. C. Uso de sistemas de tratamento de efluentes com membranas submersas para reuso de água. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 32, n. 2, p. 30-33, 2016.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8, de 21 de novembro de 2022**. 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, e dá outras providências. Belo Horizonte, MG: Presidência do Conselho Estadual de Política Ambiental e do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, 2022. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em: 2 fev. 2025.

OLIVIER, M.; DALTON, D. **Filter Fresh: Cloth-media Filters Improve a Florida**, Water Environ, p. 43-45, 2002.

OLIVIER, M. *et al.* **The Use of Cloth Media Filtration Enhances UV Disinfection through Particle Size Reduction**, Alexandria: WateReuse Association, 2003.

PEZZOLO, D. B. **Tecidos: história, tramas, tipos e usos**. 5.ed. São Paulo: Ed. Senac, 2017.

RIESS, J. *et al.* Evaluation of the Aqua-aerobics Cloth Medium Disk Filter (CMDF) for Wastewater Recycling In California, **Center for Environmental and Water Resources Engineering**, nº 01-2, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2001.

RUBINGER, C. F. **Seleção de métodos biológicos para avaliação toxicológica de efluentes industriais**. 2009. 90 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

VOUTCHKOV, N. (2013) **Desalination Engineering Planning and Design**, McGraw-Hill Book Company, New York.

WESENBERG, D.; KYRIAKIDES, I.; AGATHOS, S. N. White rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. **Biotechnol. Adv**, n. 22, p.161-187, 2003.