

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

GABRIELA ELIAS PEREIRA

ESTUDO TEÓRICO DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE UM NOVO SENSOR
FOTOMÉTRICO PARA A DETERMINAÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO
EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL

RIO DE JANEIRO

2025

Gabriela Elias Pereira

ESTUDO TEÓRICO DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE UM NOVO SENSOR
FOTOMÉTRICO PARA A DETERMINAÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO
EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Química da Universidade
Federal do Rio de Janeiro, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do grau de
bacharel em Química.

Orientadoras: Profa. Dra. Débora França de Andrade (DQA-IQ/UFRJ)
Profa. Dra. Daniella Lopez Vale (DQA-IQ/UFRJ)

Rio de Janeiro


2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Gabriela Elias Pereira


ESTUDO TEÓRICO DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE UM NOVO SENSOR
FOTOMÉTRICO PARA A DETERMINAÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO
EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Química da Universidade
Federal do Rio de Janeiro, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do grau de
bacharel em Química.

Documento assinado digitalmente
 **DEBORA FRANCA DE ANDRADE**
Data: 01/08/2025 15:25:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Débora França de Andrade, DQA-IQ/UFRJ

Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **DANIELLA LOPEZ VALE**
Data: 01/08/2025 12:45:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Daniella Lopez Vale, DQA-IQ/UFRJ

Orientadora

Profa. Fernanda Veronesi Marinho Pontes, DQA-IQ/UFRJ

Membro da Banca

Profa. Aline Domingos Gonçalves, DQA-IQ/UFRJ

Membro da Banca

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os meus que, mesmo sem este grau acadêmico, foram fundamentais para que hoje eu defenda este trabalho. Dedico aos meus do futuro para que possam enxergar que tudo é possível e podemos chegar aonde quisermos por meio do estudo. Todos vocês foram essenciais para essa conquista, seja por estar perto fisicamente ou emocionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter dado saúde e sabedoria a mim e aos meus para que eu conseguisse chegar até aqui.

Agradeço meus pais, Claudia e Eliseu que me deram todo suporte necessário desde o dia do meu nascimento até hoje.

Agradeço aos meus avós e tios maternos e paternos que me deram incentivo e suporte emocional para que essa conquista fosse possível.

Agradeço a Fernanda Truch e Luana Khisley por todo suporte de análise de dados e parte prática deste trabalho.

Agradeço ao todos os meus amigos que presencialmente ou a distância me deram incentivo e não deixaram desistir do sonho de me formar na área da química.

Agradeço aos meus professores de toda minha jornada acadêmica, os que tive contato em sala de aula, em monitoria, em projetos de extensão ou em quaisquer outras interações. Todos foram essenciais para a realização deste momento, em especial a Débora Andrade e Daniella Vale que estiveram comigo desde o início desse projeto me orientando a distância e ainda sim se fazendo super presentes para que este trabalho fosse realizado da melhor forma possível.

“Descascou o medo pra caber coragem”

(Liniker).

RESUMO

A análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) constitui **uma** ferramenta essencial para o controle e avaliação da carga orgânica presente em águas residuárias, sejam industriais, domésticas ou provenientes de corpos hídricos superficiais. Essa análise mensura o oxigênio necessário para oxidar a matéria orgânica, sendo amplamente utilizada como indicador de poluição. No contexto industrial, a determinação precisa e ágil da DQO é estratégica para monitorar a eficiência do sistema de tratamento de efluentes e assegurar o atendimento à legislação ambiental. O presente estudo de caso objetivou investigar, de forma teórica, a viabilidade da utilização do sensor fotométrico VIOMAX CAS51D, fornecido pela empresa Endress Hauser, como alternativa ao método tradicional colorimétrico descrito no procedimento 5220 D do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, que demanda tempo elevado de análise (de 4 a 6 horas) e elevado custo com reagentes e mão de obra especializada, com a finalidade de otimizar o monitoramento da carga orgânica em efluentes industriais, reduzindo o tempo de resposta das análises, os custos operacionais e os impactos ambientais associados ao uso de reagentes químicos perigosos, especialmente em estações de tratamento de efluentes da indústria cosmética. O método colorimétrico promove a oxidação de compostos orgânicos, especialmente os mais instáveis, por meio do dicromato de potássio em meio ácido, enquanto o sensor VIOMAX CAS51D realiza a análise por meio de luz ultravioleta-visível (UV/VIS), identificando compostos que absorvem em 254 nm, como corantes e outros compostos orgânicos estáveis que podem permanecer no efluente. Com base em dados teóricos, verificou-se que a utilização do sensor VIOMAX pode oferecer vantagens relevantes, tais como a obtenção de leituras em tempo real, a redução dos custos operacionais e a eliminação da geração de resíduos perigosos normalmente associados ao uso de reagentes químicos. Assim, o estudo concluiu que, apesar de o método colorimétrico ainda ser amplamente aceito e reconhecido por órgãos reguladores, a adoção de tecnologias alternativas como o sensor fotométrico pode representar avanço significativo no monitoramento ambiental, especialmente quando associada a análises de rotina em ambientes industriais que exigem respostas rápidas e economicamente viáveis. O uso de sensores ópticos desponta como tendência promissora para modernização dos sistemas de controle ambiental, contribuindo para práticas industriais mais sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: Demanda Química de Oxigênio (DQO); Efluente Industrial; Método Colorimétrico; Sensor Fotométrico; VIOMAX CAS51D.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura química do surfactante anfótero a cocoamidopropilbetaína	20
Figura 2	Corante Vermelho 40 (Allura Red AC)	21
Figura 3	Corante Azul 1 (Brilliant Blue FCF)	21
Figura 4	Corante Amarelo 5 (Tartrazine)	21
Figura 5	Corante Violeta (Violet 2)	22
Figura 6	Função e projeto do sistema do equipamento Viomax CAS51D	38
Figura 7	Sensor Viomax CAS51D	39
Figura 8	Processo de excitação	42
Figura 9	Faixas do espectro eletromagnético	43
Figura 10	Transições energéticas	44
Figura 11	Sensor Viomax Cas51d instalado na caixa de gordura	53
Figura 12	<i>Liquiline</i> do Sensor Viomax Cas51d demonstrando o resultado da análise	53
Figura 13	Fluxo de análise de DQO do método colorimétrico.	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Comparação qualitativa entre os métodos tradicional e alternativo para análise de DQO	51
Quadro 2	Tempo estimado de resposta dos métodos tradicional e alternativo para análise de DQO	69
Quadro 3	Faixa de detecção e reprodutibilidade dos métodos tradicional e alternativo para análise de DQO	70
Quadro 4	Comparativo de custos e requisitos operacionais dos métodos tradicional e alternativo para análise de DQO	71
Quadro 5	Comparativo ambiental e contribuição aos objetivos de desenvolvimento sustentável dos métodos tradicional e alternativo para análise de DQO	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPEX	Capital Expenditure (Despesas de Capitais)
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OPEX	Operational Expenditure (Despesas Operacionais)
PPB	Parte por bilhão

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	OBJETIVO	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.	EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS.....	17
2.2.	AS ANÁLISES DE EFLUENTE INDUSTRIAIS	18
2.3.	A DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)	23
2.3.1.	Método Titulométrico.....	24
2.3.2.	Método Colorimétrico	26
2.3.3.	Os Sensores de Demanda Química de Oxigênio (DQO)	31
2.3.3.1.	O Sensor Viomax CAS51D	33
2.3.4.	Espectrofotometria UV/VIS	39
2.3.5.	Calibração do Sensor Fotométrico Viomax CAS51D	43
2.4.	COMPARAÇÃO ANALÍTICA DE MÉTODOS	45
2.4.1	Comparação Qualitativa dos Métodos para Análise de DQO.....	47
2.4.2.	Aplicabilidade em Rejeitos da Indústria Cosmética	52
2.4.3.	Análise Teórica e Estatística da Correlação entre os Métodos Tradicional e Sensorial na Determinação da DQO	56
2.4.4.	Repetibilidade e Sensibilidade dos Métodos	57
2.5.	AMOSTRAGEM PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	58
3.	METODOLOGIA.....	62
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1.	COMPARAÇÃO DE TEMPO DE ANÁLISE.....	65
4.2.	PRECISÃO, REPRODUTIBILIDADE E FAIXA DINÂMICA	66
4.3.	CUSTOS OPERACIONAIS	69
4.4.	ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS.....	70
4.5.	SUSTENTABILIDADE E ALINHAMENTO AOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	71
5.	CONCLUSÃO.....	74
6.	PERSPECTIVAS.....	76
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

A análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um parâmetro amplamente utilizado em estudos de qualidade da água, especialmente no monitoramento de efluentes industriais, esgotos sanitários e corpos d'água superficiais. Trata-se de uma medida da quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica e, em alguns casos, inorgânica, presente em uma amostra líquida. Esse processo de oxidação permite quantificar a carga poluente de um efluente, sendo um dos principais indicadores da presença de compostos que, ao serem lançados no meio ambiente, podem causar degradação ambiental, eutrofização de ecossistemas aquáticos e riscos à saúde pública (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

A determinação da DQO no tratamento de efluentes industriais desempenha um papel central na gestão ambiental, pois permite avaliar de forma precisa a carga orgânica presente antes do lançamento dos efluentes nos corpos receptores. Altos níveis de matéria orgânica não tratada contribuem diretamente para a degradação da qualidade da água, promovendo a diminuição do oxigênio dissolvido, a morte de organismos aquáticos e a eutrofização dos ecossistemas (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Além dos impactos ambientais, o controle inadequado da DQO pode gerar consequências econômicas significativas para as indústrias, como multas por descumprimento de normas ambientais, aumento dos custos com tratamento corretivo e danos à reputação institucional (REIS; SILVA, 2020).

Segundo Reis e Silva (2020), o monitoramento eficiente de parâmetros como a DQO é fundamental para assegurar a eficiência dos sistemas de tratamento e atender à legislação ambiental vigente. Portanto, a medição eficaz e contínua da DQO é não apenas uma exigência regulatória, mas também uma estratégia essencial para minimizar riscos ambientais, garantir conformidade legal e otimizar processos industriais em um cenário cada vez mais voltado à sustentabilidade.

A metodologia tradicionalmente empregada para a determinação da DQO baseia-se na oxidação da matéria orgânica por meio do dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido, seguida da quantificação do cromo residual por espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Esse método, descrito no procedimento 5220D do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, é reconhecido por sua robustez e precisão. No entanto, apresenta limitações operacionais relevantes: o tempo de análise por amostra pode ultrapassar seis horas, há o uso de reagentes tóxicos e corrosivos, como ácido sulfúrico e sulfato de

mercúrio, e é necessário um controle rigoroso das condições de digestão e manuseio (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Diante dessas limitações, a busca por métodos alternativos de análise da DQO tem ganhado destaque, principalmente em contextos industriais que exigem respostas rápidas e redução de custos operacionais e ambientais.

Novas abordagens vêm sendo estudadas e desenvolvidas, incluindo métodos eletroquímicos, técnicas espectroscópicas, análises por imagens digitais e sensores ópticos. Estes últimos se destacam por permitirem a análise em tempo real, sem necessidade de preparo de amostras ou uso de reagentes, além de apresentarem boa sensibilidade e precisão (CARMO, 2021).

Neste cenário, o presente estudo busca avaliar de forma teórica, a aplicabilidade do sensor fotométrico VIOMAX CAS51D como alternativa ao método convencional na análise de DQO com foco em uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de cosméticos no estado do Paraná.

A delimitação do estudo está centrada na comparação entre o método colorimétrico (referência) e o sensor fotométrico em termos de confiabilidade analítica, tempo de resposta, custo operacional, geração de resíduos e aplicabilidade em rotinas industriais.

Para orientar a análise comparativa proposta, foram definidos critérios específicos que refletem as principais demandas operacionais e ambientais da indústria moderna. Entre esses critérios estão: o tempo de análise, fundamental para a tomada de decisões em tempo real; o custo operacional, que impacta diretamente a viabilidade de adoção em larga escala; a precisão analítica, essencial para garantir conformidade com normas técnicas e ambientais; e o impacto ambiental do processo analítico, considerando especialmente o uso e descarte de reagentes químicos. Esses parâmetros serão utilizados como base para a avaliação da aplicabilidade do sensor fotométrico VIOMAX CAS51D em comparação ao método colorimétrico de determinação da DQO.

As questões que orientam esta pesquisa são: como tornar o monitoramento da carga orgânica em efluentes industriais mais eficiente, rápido, seguro e ambientalmente sustentável, sem perder a confiabilidade exigida pelas normas técnicas e ambientais? Essa pergunta se torna ainda mais relevante ao considerar o cenário industrial atual, que exige práticas de controle mais ágeis e compatíveis com os princípios da produção limpa e da sustentabilidade.

Neste contexto, a hipótese central do trabalho é que o sensor fotométrico VIOMAX CAS51D é capaz de gerar resultados de DQO tecnicamente comparáveis aos do método tradicional, mas com vantagens operacionais importantes, como análise contínua em tempo

real, ausência de reagentes químicos, redução de tempo de análise e possibilidade de automação do controle de processo.

A justificativa deste estudo reside na crescente necessidade das indústrias por métodos analíticos mais rápidos, econômicos e sustentáveis. A modernização das estações de tratamento de efluentes, com adoção de sensores e tecnologias inteligentes, representa um passo essencial para o atendimento às exigências ambientais, para a eficiência operacional e para a competitividade do setor.

No caso específico da indústria de cosméticos, os efluentes apresentam composição complexa, com alta carga orgânica e baixa biodegradabilidade, o que exige um controle rigoroso e contínuo de parâmetros como a DQO (SILVA *et al.*, 2019).

A metodologia adotada neste trabalho consiste em uma análise teórica comparativa entre os métodos tradicionais e o sensor óptico, baseada em revisão bibliográfica, comparadas com base em parâmetros reportados na literatura para ambos os métodos. Os resultados obtidos foram comparados de forma qualitativa, considerando as variações nas faixas de concentração e o comportamento de compostos detectáveis por espectrofotometria UV/Vis.

Trabalhos anteriores, como os de Radtke, Martins e Machado (2019), têm demonstrado o potencial de técnicas alternativas como a análise por imagens digitais, destacando sua simplicidade e rapidez. Zhang, Chang e Chen (2016) abordaram o uso da fotoeletrocatalise para ampliar a faixa de detecção de compostos orgânicos.

Já Carmo (2021) analisou diferentes tipos de sensores aplicados à medição da DQO, ressaltando os benefícios dos sensores ópticos em ambientes industriais automatizados. Esses estudos reforçam a relevância do tema e demonstram que a busca por tecnologias mais eficientes e ambientalmente responsáveis está em plena expansão.

Sendo assim, espera-se que os resultados e discussões apresentados neste trabalho possam contribuir para o avanço técnico das metodologias de monitoramento de efluentes e para a adoção mais ampla de sensores fotométricos como ferramentas confiáveis e sustentáveis em estações de tratamento industrial.

1.1. OBJETIVO

Estudar, de forma teórica, a viabilidade da utilização do sensor fotométrico VIOMAX CAS51D na determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) em uma estação de tratamento de efluente industrial da indústria de cosméticos, por meio de uma comparação entre os compostos orgânicos detectáveis por esse sensor e aqueles quantificados pelo método

colorimétrico convencional com dicromato de potássio, considerando aspectos analíticos, operacionais, econômicos e ambientais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS

Os efluentes gerados pela indústria de cosméticos possuem características específicas relacionadas aos diversos ingredientes e processos de fabricação utilizados na produção de cosméticos como cremes, shampoos, loções, perfumes, entre outros.

A composição desses efluentes é predominantemente orgânica, proveniente de matérias-primas e de compostos utilizados em diferentes etapas da fabricação dos produtos. Entre os principais componentes presentes nos efluentes da indústria de cosméticos, encontram-se emulsionantes, conservantes, fragrâncias, corantes e outros aditivos que são comuns em fórmulas cosméticas (SANTOS *et al.*, 2018).

Em termos de características físico-químicas, o pH dos efluentes pode variar dependendo dos ingredientes usados na fabricação, mas geralmente apresenta pH ligeiramente ácido ou neutro. No entanto, durante o processo de produção, podem ocorrer flutuações no pH, o que influencia diretamente os métodos de tratamento, como coagulação e floculação, que são utilizados para tratar os efluentes.

A DQO desses efluentes tende a ser alta, uma vez que há uma grande quantidade de compostos orgânicos presentes, como emulsões e polímeros, que podem consumir oxigênio durante os processos de degradação (Silva *et al.*, 2019). Além disso, os efluentes podem conter sólidos suspensos, como emulsões e pigmentos, que são subprodutos da fabricação de cosméticos (CARVALHO; ANDRADE, 2017).

Outro aspecto importante a ser destacado é a presença de substâncias tóxicas e poluentes nos efluentes da indústria de cosméticos, que podem ser prejudiciais ao meio ambiente, principalmente para organismos aquáticos. Dentre essas substâncias, encontram-se solventes orgânicos, como álcoois (etanol, isopropanol) e acetato de etila, que são comumente utilizados em várias formulações cosméticas.

Esses solventes podem ser tóxicos ou contribuir para a poluição do ar e da água (COSTA *et al.*, 2020). Os emulsionantes também estão presentes, como surfactantes e emulsificantes, que desempenham um papel fundamental na estabilização das fórmulas dos produtos, mas que, quando liberados nos efluentes, podem ser difíceis de degradar. Exemplos desses compostos incluem o lauril sulfato de sódio, o lauril éter sulfato de sódio e os estearatos (ABREU *et al.*, 2016).

Além disso, é comum a utilização de corantes e fragrâncias sintéticas na produção de cosméticos, que também se encontram nos efluentes da indústria. Estes são compostos

orgânicos complexos que podem ter um impacto ambiental, especialmente se forem liberados em grandes quantidades (LIMA; PEREIRA, 2015).

Conservantes como parabenos (metilparabeno, etilparabeno e propilparabeno), amplamente usados para prevenir o crescimento de micro-organismos, são outras substâncias frequentemente encontrada nos efluentes dessa indústria. Tais compostos podem estar presentes em concentrações significativas nos efluentes e representam uma preocupação ambiental devido ao seu potencial de bioacumulação (SILVA; FERREIRA, 2021).

Ademais, compostos como ftalatos, utilizados como plastificantes em cosméticos (especialmente em esmaltes e perfumes), também podem ser encontrados nos efluentes. Estes compostos são conhecidos por sua persistência no ambiente e seu potencial de causar efeitos hormonais (MOURA *et al.*, 2018).

A presença de ácidos graxos e derivados, como triacilgliceróis provenientes de óleos vegetais, também é comum nos efluentes, uma vez que muitos cosméticos contêm esses ingredientes. Esses compostos podem ser liberados durante o processo de fabricação (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Por fim, silicones como dimeticona e ciclopentasiloxano, usados para conferir suavidade e brilho aos produtos cosméticos, também são encontrados nos efluentes e são conhecidos por sua dificuldade de degradação biológica (GOMES; PINTO, 2020).

2.2. AS ANÁLISES DE EFLUENTE INDUSTRIAIS

As análises químicas de efluentes industriais são essenciais para avaliar tanto a qualidade do efluente durante o tratamento quanto a qualidade com a qual ele será descartado nos corpos hídricos.

A presença de efluentes industriais não tratados adequadamente pode resultar na degradação dos corpos hídricos, prejudicando o ecossistema aquático e afetando a saúde pública. Por esse motivo, é imprescindível realizar uma série de análises em uma estação de tratamento de efluentes (ETE) para garantir a qualidade do efluente final e proteger o ambiente aquático (LIMA, 2019).

Na ETE da indústria de cosméticos em questão, são realizadas as seguintes análises, de acordo com a resolução do CONAMA 430: pH, oxigênio dissolvido (OD), temperatura, turbidez, sólidos suspensos, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e DQO. A indústria de cosméticos tem como limite de DQO 125 mg O₂/L e de DBO 35 mg/L para o efluente tratado, conforme as diretrizes estabelecidas pelo Estado do Paraná.

Segundo Lima (2019), a caracterização dos efluentes é realizada por meio de diversas análises físico-químicas e biológicas, as quais visam garantir a eficiência do tratamento e a preservação ambiental. A DBO tem como finalidade mensurar a quantidade de oxigênio necessária para a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos presentes no efluente.

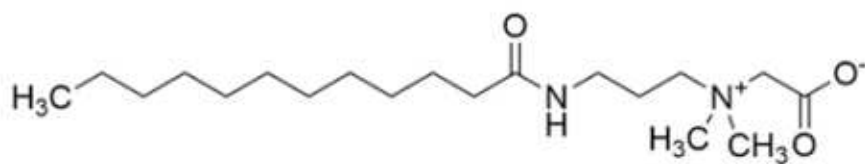
Por sua vez, a DQO quantifica o oxigênio requerido para a oxidação química dessa matéria orgânica. A análise do potencial hidrogeniônico (pH) permite determinar o caráter ácido ou básico do efluente, influenciando diretamente a atividade biológica nos sistemas de tratamento.

O parâmetro oxigênio dissolvido indica as condições de qualidade do meio aquático, sendo essencial para a manutenção da vida microbiana. A temperatura também é um fator relevante, pois afeta a solubilidade dos gases, a velocidade de sedimentação das partículas e os processos biológicos envolvidos no tratamento. A turbidez, por sua vez, auxilia na detecção de coloides e na avaliação da transparência do efluente, sendo um indicativo indireto da presença de partículas em suspensão. Finalmente, a análise dos sólidos suspensos permite avaliar a carga poluente do efluente, uma vez que diferentes formações de sólidos podem representar distintas origens de contaminação.

O efluente residual analisado neste estudo é proveniente de uma indústria de cosméticos, e possui como característica principal a presença de compostos orgânicos de baixa biodegradabilidade, como surfactantes, corantes, fragrâncias e conservantes. A presença desses compostos torna o tratamento do efluente essencial antes do seu descarte nos corpos hídricos (SILVA, 2016). Entre os compostos orgânicos predominantes, os surfactantes e corantes são os mais relevantes (SILVA, FÁVARO, 2010).

Os surfactantes, em geral, são conhecidos por serem compostos híbridos, possuindo uma estrutura química onde parte da molécula é composta por um hidrocarboneto (saturado ou insaturado), que representa a parte apolar da molécula, e outra parte seria hidrofílica (polar) composta por um grupo funcional carregado (FERREIRA, 2022). No efluente de estudo do presente trabalho pode-se encontrar o surfactante anfótero cocoamidopropilbetaína utilizado na fabricação de xampu (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura química do surfactante anfótero a cocoamidopropilbetaína.



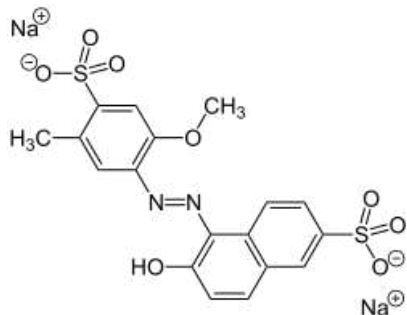
Fonte: Pedreira (2023)

Já no caso dos corantes, pode-se destacar os compostos aromáticos como classe orgânica predominante neste tipo de molécula, podendo ser ligada a compostos hidrofílicos, nitrogenados dentre outros, sendo a estabilidade uma forte característica desse tipo de composto orgânico (FERREIRA, 2022).

Portanto, os corantes utilizados na indústria de cosméticos desempenham um papel fundamental na formulação de produtos, como xampus, cremes e loções. Esses corantes, frequentemente compostos por moléculas orgânicas complexas, são escolhidos por sua capacidade de proporcionar coloração estável e vibrante aos produtos. A maioria dos corantes cosméticos pertence a duas classes principais: corantes sintéticos e corantes naturais.

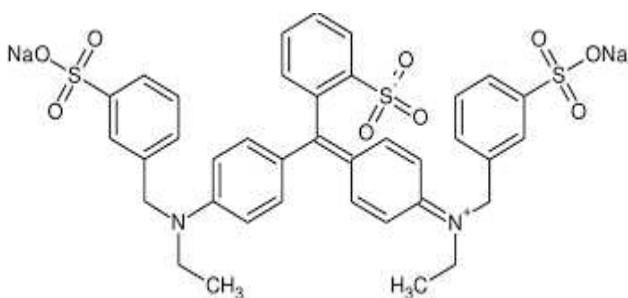
Os corantes sintéticos mais comuns na indústria cosmética são compostos aromáticos que, devido à sua estrutura química estável, oferecem uma cor duradoura. Esses corantes são compostos por anéis aromáticos (como o benzeno), frequentemente ligados a grupos funcionais que podem incluir átomos de oxigênio, nitrogênio ou enxofre, tornando-os solúveis em água ou em óleos. Alguns exemplos incluem:

1. Corante Vermelho 40 (Allura Red AC): Este corante é amplamente utilizado em cosméticos e produtos de cuidados pessoais. Quimicamente, é um corante azoico, composto por um sistema de anéis aromáticos ligados por uma ligação azo ($-N=N-$), o que lhe confere uma cor vermelha vibrante (Figura 2).

Figura 2 - Corante Vermelho 40 (Allura Red AC)

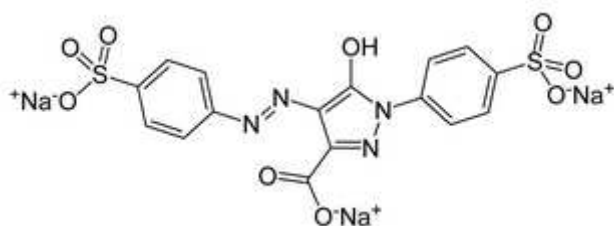
Fonte: Sá *et al* (2020)

2. Corante Azul 1 (Brilliant Blue FCF): Utilizado principalmente em produtos como géis e cremes, este corante é um derivado de um corante *triphenylmethane*, com a presença de um grupo sulfonato, o que melhora sua solubilidade em água (Figura 3).

Figura 3 - Corante Azul 1 (Brilliant Blue FCF)

Fonte: Sá *et al* (2020)

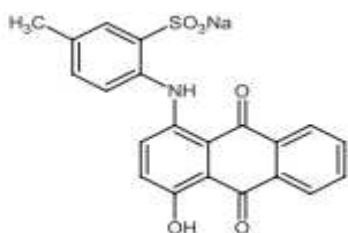
3. Corante Amarelo 5 (Tartrazine): Este é um corante sintético amplamente usado em cosméticos e cuidados pessoais. Sua estrutura química contém um anel pirazolônico e grupos sulfonados, permitindo a solubilização em água (Figura 4).

Figura 4 – Corante Amarelo 5 (Tartrazine)

Fonte: Guaratini; Zanoni (2000).

4. Corante Violeta (Violet 2): Um exemplo de corante utilizado em cosméticos para criar tons de violeta. A estrutura química do corante violeta é baseada em anéis aromáticos complexos e grupos substituintes que podem incluir átomos de oxigênio ou nitrogênio, resultando em uma molécula com alta estabilidade. Sua estrutura pode ser exemplificada na Figura 5.

Figura 5 - Corante Violeta (Violet 2)



Fonte: De Oliveira (2014)

Os corantes naturais são derivados de fontes vegetais, animais ou minerais e são preferidos em alguns produtos cosméticos devido ao seu apelo por serem considerados mais seguros e menos suscetíveis a causar alergias ou irritações (PEREIRA *et al.*, 2019).

Os corantes naturais comumente utilizados em cosméticos incluem: a) Betacaroteno: Extraído de vegetais como cenouras, é um corante amarelo-avermelhado que possui uma estrutura química baseada em um sistema de anéis terpenoides. Ele também é um precursor da vitamina A, o que contribui para seu uso em produtos cosméticos que oferecem benefícios antioxidantes (VASCONCELOS *et al.*, 2017); b) Curcumina: Proveniente da cúrcuma, a curcumina é um corante amarelo com propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias. Sua estrutura química é baseada em um anel fenólico com uma cadeia lateral que confere amarela intensa (SANTOS *et al.*, 2015); c) Antocianinas: Encontradas em frutas como uvas e amoras, são responsáveis por cores variando do vermelho ao roxo. Quimicamente, elas consistem em uma estrutura de flavonoide, um tipo de composto polifenólico, que é altamente solúvel em água e sensível ao pH (MATOS *et al.*, 2018).

Os corantes sintéticos e naturais presentes nos efluentes industriais, especialmente os corantes aromáticos e azoicos, podem ser difíceis de remover devido à sua estabilidade química. A presença desses compostos em efluentes industriais, como os provenientes da indústria de cosméticos, exige processos de tratamento adequados, pois eles podem ser tóxicos para organismos aquáticos e afetar a qualidade da água (SILVA *et al.*, 2020).

O tratamento eficaz de efluentes industriais, portanto, deve envolver tecnologias capazes de decompor ou remover esses compostos orgânicos de maneira eficaz, como processos

biológicos e físico-químicos, para minimizar os impactos ambientais (OLIVEIRA; SILVA, 2017).

Esses corantes e outros compostos orgânicos presentes nos efluentes da indústria cosmética, como os surfactantes, requerem tratamentos especializados, dado que são difíceis de biodegradar e podem persistir no meio ambiente se não forem adequadamente tratados (CARVALHO *et al.*, 2019). Por esse motivo, análises como a DQO são de extrema importância para o tratamento desses efluentes.

2.3. A DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)

A DQO é uma medida da quantidade de oxigênio necessário para oxidar a matéria orgânica presente em uma amostra de água. Esta análise é um parâmetro importante para a avaliação da qualidade da água, pois indica a quantidade de poluentes orgânicos presentes na amostra, que podem ser prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Além disso, a DQO também é utilizada para monitorar o tratamento de águas residuais, pois indica a eficiência do processo de remoção de matéria orgânica.

O objetivo do tratamento de águas residuais é remover os poluentes orgânicos presentes na amostra, reduzindo assim sua DQO. A medição da DQO antes e depois do tratamento permite avaliar a eficiência do processo e fazer ajustes necessários para melhorar sua eficiência.

A redução da DQO pode ser alcançada pelo tratamento adequado das águas residuais. Existem diversos processos de tratamento disponíveis, como aeração, lodos ativados, filtração biológica e processos químicos. Cada processo tem suas vantagens e desvantagens, e deve ser escolhido com base nas características da amostra e nos objetivos do tratamento (CARMO, 2021).

Grandes indústrias que geram efluentes com uma alta carga orgânica, antes de passar por qualquer tratamento, que são danosos ao meio ambiente, tem essa análise como um parâmetro de extrema importância, para o conhecimento da eficiência do tratamento desses efluentes antes de ser lançado ao corpo hídrico de destino.

A maior consequência de se ter um corpo hídrico com uma alta carga de poluentes orgânicos é a eutrofização do sistema aquático que gera a escassez do oxigênio dissolvido fazendo com que as vidas presentes ali sejam extintas. Sendo assim, o tratamento de efluentes industriais se faz mais do que necessário, tendo a DQO como uma das análises mais importantes para o controle desse tratamento (CARMO, 2021).

A determinação da DQO pode ser realizada por dois métodos principais em laboratório:

titulométrico (2.3.1) e colorimétrico (2.3.2), conforme verifica-se a seguir.

2.3.1. Método Titulométrico

No método titulométrico, descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Standard Methods), a amostra a ser analisada é submetida a um excesso de dicromato de potássio e é determinada por titulação com sulfato ferroso amoniacal (FAS), onde a solução vai da cor azul- esverdeado para a cor marrom avermelhada. Desta forma, obtém-se o valor em mg de O₂/L de amostra, que pode ser calculado pela Equação 1.

$$DQO \text{ por } mgO_2/L = \frac{(B - A) \times M \times 8000}{\text{Volume da amostra}}$$

Equação 1

Onde:

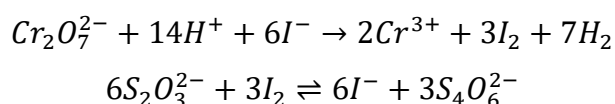
B: Volume, mL, FAS utilizado na titulação

A: Volume, mL, FAS utilizado para branco

M: Molaridade de FAS

8000: miliequivalente de oxigênio x 1000mL/L

No método de titulação direta a amostra a ser analisada é titulada com sulfato ferroso amoniacal de forma que todo dicromato de potássio seja reduzido a Cr³⁺. Quando se trata do método indireto, a titulação funciona da seguinte forma: Adiciona-se iodeto de potássio na solução de dicromato de potássio, essa reação libera iodo sendo esse titulado com uma solução padrão de tiosulfato de sódio e usa-se amido como indicador. A reação global deste método encontra-se descrita na Reação 1:



Reação 1

O método titulométrico para determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) é amplamente utilizado em análises ambientais e industriais devido à sua robustez e capacidade de análise de amostras turvas e coloridas, mesmo após o processo de digestão. Essa característica o torna especialmente útil para efluentes com alta interferência óptica. Além

disso, sua consolidação em protocolos normativos, como o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, confere confiabilidade técnica e aceitação em auditorias e processos legais (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Outra vantagem significativa é sua ampla aplicabilidade na quantificação de compostos orgânicos oxidáveis por dicromato em meio ácido, abrangendo álcoois, ácidos carboxílicos, aldeídos, cetonas, fenóis, surfactantes aniônicos e certos pesticidas organofosforados (GOLDBERG, 2015).

O método também pode oxidar materiais particulados e sólidos suspensos, desde que degradáveis nas condições da digestão. Com ajustes na concentração dos reagentes e no volume da amostra, é possível adaptar o procedimento para diferentes faixas de concentração, atingindo níveis confiáveis entre 20 e 1000 mg/L de O_2 , conforme a carga orgânica presente (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Apesar dessas vantagens, o método apresenta algumas limitações. Entre elas, destaca-se o alto consumo de reagentes tóxicos e corrosivos, como o dicromato de potássio e o ácido sulfúrico, o que eleva os custos operacionais e os riscos ocupacionais (VOGEL, 2011).

Outro ponto crítico é a subjetividade na identificação do ponto final da titulação, que depende da observação visual da mudança de cor, gerando possíveis variações entre analistas. Além disso, a faixa analítica é limitada até cerca de 400 mg/L de O_2 , exigindo concentrações mais elevadas de dicromato e maiores tempos de digestão para amostras mais carregadas (Standard Methods 5220 C) (APHA; AWWA; WEF, 2017).

A precisão e a sensibilidade do método também podem ser afetadas por fatores operacionais, como variações na temperatura de digestão, no tempo de refluxo e na exatidão da titulação. Essas etapas exigem padronização rigorosa e analistas bem treinados, uma vez que o processo total pode demandar de 3 a 4 horas por amostra, incluindo digestão, destilação e titulação (VOGEL, 2011).

Outro aspecto crítico é a interferência de substâncias inorgânicas redutoras, como íons nitrito (NO_2^-), sulfetos (S^{2-}) e íon ferroso (Fe^{2+}), que reagem com o dicromato e podem superestimar os resultados de DQO. Tais interferências são comuns em efluentes industriais e esgotos domésticos tratados. Para mitigá-las, é recomendada a realização de pré-tratamentos da amostra, como a adição de sulfato de mercúrio para precipitação de cloretos e o uso de agentes complexantes (MOREIRA et al., 2015; APHA; AWWA; WEF, 2017).

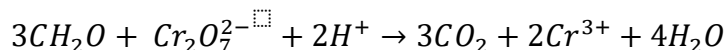
Por fim, embora existam métodos alternativos, como a titulação potenciométrica, que elimina a subjetividade na detecção do ponto final, o método titulométrico permanece como uma ferramenta robusta e acessível para a estimativa da carga orgânica de efluentes e águas

residuais. Sua eficácia está diretamente relacionada à escolha adequada do procedimento, considerando a matriz da amostra, os possíveis interferentes e os objetivos da análise, assegurando que os resultados obtidos sejam representativos e úteis para a gestão e controle da qualidade da água (METCALF; EDDY, 2014; REIS; SILVA, 2020).

2.3.2. Método Colorimétrico

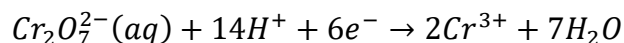
A DQO é determinada com base na oxidação da matéria orgânica pela ação de um agente oxidante forte (geralmente dicromato de potássio) em meio ácido, com formação de produtos coloridos. Essa cor gerada é então medida por espectrofotometria na faixa do visível, técnica conhecida como espectrofotometria com reagente cromogênico, ou colorimetria, que é um subconjunto da espectrofotometria. (GOLDBERG, 2015).

Em meio ácido, o dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), que tem como característica ser uma solução de cor alaranjada e se reduz a Cr^{3+} , que apresenta uma cor verde-escuro. Esse processo de oxidação pode ser representado pela reação 2, de forma genérica, com um composto orgânico (VOGEL, 2011).



Reação 2

A redução do dicromato de potássio ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) a íons Cr^{3+} em meio ácido ocorre pelo processo de oxidação e redução, no qual o dicromato (cor alaranjada) é reduzido, geralmente, a íons Cr^{3+} (cor verde-escuro) (ATKINS, 2014). Esse processo pode ser representado pela reação 3.

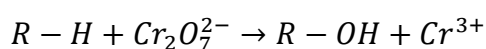


Reação 3

Portanto, o composto orgânico pode ser oxidado de acordo com a sua estrutura e natureza, mas, de maneira geral, a reação de oxidação envolve a perda de elétrons por parte do composto orgânico, o que leva à sua conversão em produtos mais oxidados. A mudança de cor do dicromato, de alaranjado para verde, reflete essa mudança de valência do cromo de +6 para +3 (ATKINS, 2014; SKOOG *et al.*, 2013).

O dicromato de potássio ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) dissolve-se em solução aquosa e interage com os íons de hidrogênio (H^+) presentes no meio ácido, formando um complexo aquoso. A presença de íons H^+ no meio facilita a redução do cromo hexavalente (Cr^{6+}) para o cromo trivalente (Cr^{3+}), já que o cromo hexavalente é altamente instável em soluções ácidas e propenso a ser reduzido (BOEHM, 2012). A acidez do meio é crucial para a estabilidade do íon dicromato e para o sucesso da reação redox (ATKINS, 2014).

Quando se fala de interação do íon dicromato com os compostos orgânicos, pode-se entender a sua interação pela reação 4.



Reação 4

Aqui, o R-H representa o composto orgânico, que sofre oxidação ao perder elétrons, enquanto o dicromato é reduzido a íons Cr^{3+} . Esse processo exemplifica a oxidação de álcoois ou aldeídos, amplamente utilizada em reações analíticas, como nas titulações de oxidação (MENDHAM et al., 2000; FOX; WHITESELL, 2017). A reação de oxidação entre o dicromato e compostos orgânicos ocorre devido a interações moleculares específicas entre os reagentes, envolvendo transferência de elétrons e forças de atração entre átomos e grupos funcionais (BOEHM, 2012). O comportamento redox do dicromato, aliado à estrutura química dos compostos orgânicos, viabiliza um mecanismo eficiente e seletivo para a oxidação. Em geral, os compostos orgânicos envolvidos, como álcoois, aldeídos e outras substâncias redutoras, possuem átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio que interagem com os íons dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (SILVA; ALMEIDA, 2008).

No caso específico dos álcoois (R-OH), o grupo funcional hidroxila ($-\text{OH}$) representa a porção mais reativa da molécula. O oxigênio da hidroxila, por sua alta densidade eletrônica, é particularmente suscetível à oxidação. O dicromato, atuando como agente oxidante, retira elétrons do oxigênio da hidroxila, promovendo a formação de uma ligação dupla entre o carbono e o oxigênio, o que leva à formação de aldeídos ou cetonas (MENDHAM et al., 2000; FOX; WHITESELL, 2017). Nesse processo, o composto orgânico sofre oxidação, enquanto o cromo do dicromato é reduzido de seu estado de oxidação +6 (Cr^{6+}) para +3 (Cr^{3+}). Durante a reação, forma-se inicialmente um complexo de ativação no qual o centro metálico do cromo, com carga positiva, interage eletrostaticamente com átomos eletronegativos dos grupos funcionais presentes nos compostos orgânicos, como as hidroxilas dos álcoois e as carbonilas dos aldeídos (FOX; WHITESELL, 2017). Após essa interação inicial, ocorre a transferência de

elétrons, com formação de ligações covalentes transitórias, culminando na transferência de um átomo de oxigênio do dicromato para o composto orgânico oxidado (BOEHM, 2012). Adicionalmente, forças secundárias, como ligações de hidrogênio e interações de Van der Waals, podem ocorrer em meio aquoso ou acidificado, contribuindo para a estabilização dos complexos intermediários (MENDHAM et al., 2000).

A eficiência e seletividade do dicromato como agente oxidante decorrem da soma dessas interações moleculares. A reatividade do dicromato com diferentes classes de compostos orgânicos pode ser exemplificada por diversas reações. Álcoois primários, por exemplo, são oxidados inicialmente a aldeídos e, sob condições mais severas, a ácidos carboxílicos, como ocorre com o etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), que pode ser convertido em acetaldeído (CH_3CHO) e, posteriormente, em ácido acético (CH_3COOH). Álcoois secundários, como o isopropanol ($\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$), são oxidados diretamente a cetonas, como a acetona (CH_3COCH_3). Aldeídos, por sua vez, são facilmente oxidados a ácidos carboxílicos; por exemplo, o acetaldeído é transformado em ácido acético e o formaldeído (HCHO) em ácido fórmico (HCOOH). Já os ácidos carboxílicos, embora já estejam em um estado de oxidação elevado, podem ser degradados sob condições drásticas a dióxido de carbono e água, como ocorre com o ácido benzóico ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$). Compostos fenólicos, como o fenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$), podem ser oxidados a quinonas, como a benzoquinona ($\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$), e o 1-naftol pode ser transformado em naftoquinona ($\text{C}_{10}\text{H}_6\text{O}_2$). Aminas primárias e secundárias também são suscetíveis à oxidação, embora mais lentamente, sendo que a anilina ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$) pode formar nitrobenzeno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$), enquanto a dimetilamina (CH_3NHCH_3) pode originar uma nitrosamina ($\text{CH}_3\text{N}(\text{NO})\text{CH}_3$). Hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos também podem ser oxidados em condições apropriadas: por exemplo, o ciclo-hexeno (C_6H_{10}) pode gerar ciclo-hexanona ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$), e o tolueno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) pode ser oxidado a ácido benzóico.

Além dos compostos orgânicos de interesse, substâncias inorgânicas como cloretos, nitritos, sulfetos e tiosulfatos também podem ser oxidadas pelo dicromato, interferindo nos resultados da determinação da DQO (SILVA, 2019; APHA; AWWA; WEF, 2017). Para minimizar essas interferências, são adotadas etapas preparatórias. Por exemplo, adiciona-se sulfato de mercúrio para mascarar a interferência dos cloretos, enquanto haletos podem ser removidos por precipitação com íons prata, seguida de filtração. Tais medidas são fundamentais para garantir a seletividade e a precisão do método.

O procedimento de determinação da DQO com dicromato de potássio é realizado por meio de digestão úmida. A técnica consiste em adicionar à amostra uma solução padrão de dicromato em excesso, juntamente com ácido sulfúrico concentrado e catalisador (geralmente

sulfato de prata). A mistura é aquecida a cerca de 150 °C, por duas horas, em frascos hermeticamente fechados (digestores térmicos) que permitem a oxidação da matéria orgânica presente na amostra. Durante a digestão, o dicromato oxida os compostos orgânicos, sendo parcialmente reduzido de Cr^{6+} para Cr^{3+} . Após o resfriamento, o excesso de dicromato remanescente pode ser quantificado por titulação com sulfato ferroso amoniacal (FAS), ou por leitura espectrofotométrica (método colorimétrico), utilizando-se a variação da absorbância do íon Cr^{6+} para determinar o quanto foi consumido durante a oxidação.

A quantidade de Cr^{6+} reduzido é diretamente proporcional à carga orgânica da amostra, e o resultado é expresso em miligramas de oxigênio consumido por litro ($\text{mg O}_2/\text{L}$). No entanto, esse método apresenta um tempo de resposta mínimo de três horas, o que representa uma limitação prática significativa em processos que demandam monitoramento contínuo. Em situações nas quais o efluente apresenta uma demanda inicial muito alta de oxigênio, a demora no resultado pode comprometer o ajuste operacional em tempo hábil, resultando em descargas fora dos padrões legais.

Como alternativa, sensores ópticos e espectrofotométricos vêm sendo estudados e empregados em diversas estações de tratamento de efluentes, oferecendo a vantagem de monitoramento em tempo real. Esses sensores apresentam importantes benefícios: são utilizados diretamente no processo, minimizando erros por contaminação durante a coleta; consomem menos reagentes, o que reduz os custos operacionais; economizam tempo dos operadores da ETE; e entregam resultados de forma imediata, permitindo intervenções corretivas mais rápidas nos momentos em que a DQO exerce papel crítico.

Dessa forma, embora o método tradicional de oxidação com dicromato continue sendo a referência normativa para determinação da DQO, seu tempo de resposta e a necessidade de manuseio laboratorial rigoroso justificam o estudo e o desenvolvimento de metodologias alternativas mais ágeis e seguras. A base desse método, entretanto, permanece cientificamente sólida, sustentada por complexas interações eletrostáticas e covalentes entre os reagentes, com formação de intermediários de reação e transferência de elétrons, o que garante a eficiência e a seletividade na oxidação dos compostos orgânicos.

Em resumo, o método colorimétrico aplicado à determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) apresenta diversas vantagens que justificam sua ampla utilização em laboratórios e estações de tratamento de efluentes. Uma de suas principais características positivas é o menor consumo de reagentes, quando comparado ao método titulométrico, o que contribui significativamente para a redução dos custos operacionais e da geração de resíduos perigosos (GOLDBERG, 2015).

Além disso, esse método permite maior facilidade de automação, podendo ser aplicado em equipamentos espectrofotométricos ou integrado a sensores que realizam medições diretamente no processo de tratamento, o que reduz a possibilidade de contaminação das amostras por manipulação inadequada.

Outra vantagem relevante é a elevada precisão e reprodutibilidade que o método oferece, desde que as condições da amostra estejam adequadas, isto é, sem turbidez ou coloração residual que interfiram na leitura espectrofotométrica. Adicionalmente, o método colorimétrico possibilita medições em tempo real, o que é essencial para ajustes operacionais imediatos e para o controle contínuo da eficiência do tratamento, garantindo que os efluentes tratados atendam aos parâmetros legais de lançamento.

Apesar dessas qualidades, o método apresenta limitações que precisam ser cuidadosamente consideradas em sua aplicação. A amostra, após o processo de digestão, não pode apresentar turbidez nem cor significativa, pois essas características interferem diretamente na medição da absorvância, comprometendo a exatidão dos resultados (GOLDBERG, 2015).

Além disso, o tempo total de análise, que pode chegar a aproximadamente três horas, é relativamente elevado, dificultando a tomada de decisões rápidas em processos que demandam respostas imediatas, como em estações de tratamento que operam de forma contínua.

Outro fator limitante é a suscetibilidade a interferências de substâncias inorgânicas oxidáveis presentes nas amostras, como cloretos, nitritos, sulfetos e tiosulfatos, que também reagem com o dicromato de potássio e podem superestimar os valores de DQO.

Para minimizar tais interferências, são necessários tratamentos prévios, como a adição de sulfato de mercúrio, o que aumenta tanto os custos quanto a complexidade operacional da análise (APHA; AWWA; WEF, 2017). Soma-se a isso o fato de o dicromato de potássio ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), reagente central no processo, ser uma substância potencialmente tóxica e classificada como cancerígena, o que exige cuidados rigorosos quanto ao seu manuseio, armazenamento e descarte, em conformidade com as legislações ambientais e de segurança do trabalho (ATKINS, 2014).

Dessa forma, embora o método colorimétrico proporcione benefícios significativos em termos de economia, praticidade e integração com novas tecnologias, sua aplicabilidade está condicionada à adequação da amostra, à existência de infraestrutura apropriada e à adoção de medidas de segurança rigorosas, especialmente quando utilizado em ambientes com alta variabilidade de carga orgânica ou presença de interferentes.

2.3.3. Os Sensores de Demanda Química de Oxigênio (DQO)

No mercado, atualmente, existem diversos tipos e formas de sensores que podem ser empregados para a determinação da DQO para diferentes tipos e necessidades de processo. Há sensores eletroquímicos, que usam imagens digitais bem como métodos espectroscópicos, utilizando a quimiluminescência, estão sendo amplamente explorados na indústria para se obter um maior controle no processo de tratamento de efluentes (CARMO, 2021).

O método eletroquímico para a determinação de DQO é recente nos estudos já publicados, mas vem se mostrando eficiente, com respostas mais rápidas do que o processo colorimétrico utilizando $K_2Cr_2O_7$.

No entanto, tem como desvantagens o fato de não ter um espectro de leitura tão amplo, restringindo assim o uso deste método. Este tem como princípio o uso de eletrodos com alta atividade catalítica, podendo ser em carbono, diamante dopado com boro, cobre, níquel e diversos outros materiais (GARCÍA-RAMIREZ *et al.*, 2024).

Visando sanar a problemática da faixa de leitura deste método, estudos recentes utilizam fotoeletrocatalise para a determinação de DQO e tem como principal ativo os eletrodos de TiO_2 onde sua superoxidação e boa estabilidade em contato com a luz UV conseguem ampliar a faixa de leitura desta análise (ZHANG; CHANG; CHEN, 2016).

Quando se faz o uso imagens digitais para a determinação de análises químicas, utiliza-se o tratamento de imagens por *softwares* computacionais. Este método se mostra promissor nas pesquisas publicadas pelo fato de ter uma resposta de análise rápida e se mostrar um método mais compacto e de simples manuseio do que os demais, visando assim atender o mercado industrial (RADTKE; MARTINS; MACHADO, 2019).

Radtke *et al.*, em 2019, propôs um método de determinação de DQO por imagens digitais tratadas pelo *software* Image J e por *smartphones*. O tratamento das imagens foi realizado pelo vetor RGB (*Red*, *Green* e *Blue*), que se mostra promissor quando comparado ao método colorimétrico.

O método proposto neste trabalho, se mostrou vantajoso pelo fato não haver necessidade de transferência da amostra para uma cubeta visto que a análise pode ser realizada dentro do tubo de ensaio de preparo da mesma, pela redução do volume de resíduos, pela redução do tempo de análise e pelo baixo custo operacional de instrumentação.

Tendo um fotomultiplicador que detecta a intensidade dos sinais emitidos pela amostra analisada, o método que utiliza a quimioluminescência para a determinação de DQO tem como principais características ter uma sensibilidade alta, uma faixa ampla de detecção, além de ter

um tempo de resposta rápido, podendo ter seus resultados detectados em ppb (RADTKE; MARTINS; MACHADO, 2019).

Outra técnica de análise que pode ser empregada, é o uso do luminol ou induzido por gás ozônio que quando entra em contato a amostra injetada, gera uma reação quimioluminescente, onde é lida como um sinal elétrico. Como desvantagens, essa técnica utiliza um alto volume de reagentes oxidantes, além de ainda não ter sido desenvolvida para uso em um instrumento comercial ou uso de rotina nos estudos até então publicados, que seja viável para a indústria (ZHAO *et al.*, 2019).

Grandes indústrias empregam equipamentos sofisticados e totalmente automatizados para monitorar seus efluentes, eliminando a necessidade de qualquer operação manual. Esses sistemas utilizam métodos alternativos de alta sensibilidade e precisão, como sondas fotocatalíticas com UV-vis, combinadas com uma fonte ultrassônica, que previne a fixação de impurezas e assegura a confiabilidade dos resultados em tempo real (RADTKE; MARTINS; MACHADO, 2019). Dentre eles, pode-se citar:

a) o Viomax é um sensor fotométrico de alta precisão amplamente utilizado em análises de efluentes e outras aplicações ambientais devido à sua sensibilidade e faixa espectral ajustável. Ele tem uma faixa de detecção de DQO de 0 a 500 mg/L, com um limite de detecção aproximado de 0,5 mg/L e um desvio padrão inferior a 1%;

b) o Hach DR900, um dos modelos mais populares da Hach, oferece sensores fotométricos portáteis e robustos para a análise de água e efluentes, sendo utilizado para detectar parâmetros como cloro livre, fósforo e nitrogênio. Este modelo tem uma faixa de detecção de DQO de 0 a 1500 mg/L, com limite de detecção de aproximadamente 0,1 mg/L e um desvio padrão que varia entre 1% e 2%, dependendo da concentração de DQO;

c) a Horiba, com o modelo U-50, oferece sensores fotométricos que são amplamente usados no monitoramento de qualidade de água e efluentes. O modelo U-50 é versátil e preciso, permitindo a leitura de múltiplos parâmetros, incluindo DQO, com uma faixa de detecção que vai de 0 a 2000 mg/L, limite de detecção de aproximadamente 0,5 mg/L e desvio padrão de 1% a 3%, dependendo das condições de medição;

d) os sensores Orion, da Thermo Fisher Scientific, são fotômetros utilizados tanto em versões de bancada, quanto portáteis para análise de efluentes. A Thermo Fisher oferece instrumentos de alta confiabilidade para a indústria ambiental, com os sensores Orion possuindo uma faixa de detecção de DQO de 0 a 1500 mg/L, limite de detecção de aproximadamente 0,2 mg/L e desvio padrão em torno de 1% a 2%;

e) os fotômetros da linha Lambda da PerkinElmer são conhecidos pela sua alta

qualidade e são amplamente utilizados em laboratórios. Esses modelos têm uma faixa de detecção de DQO que pode variar entre 0 e 500 mg/L e 0 a 1000 mg/L, com limite de detecção de cerca de 0,1 mg/L e desvio padrão de 0,5% a 2%, dependendo das condições do laboratório e;

f) o DR1900 da Hach é uma versão mais compacta, com uma faixa de leitura espectrofotométrica ampla, que vai de 0 a 1500 mg/L para a DQO. O limite de detecção deste modelo é de aproximadamente 0,1 mg/L para DQO, e o desvio padrão é de 1% a 2%, dependendo da concentração de DQO e do reagente utilizado.

Esses sensores, com suas características e faixas de detecção, oferecem uma solução confiável para análises precisas de DQO em efluentes e águas, sendo fundamentais em monitoramento ambiental e controle de qualidade.

É importante ressaltar que alguns sensores de DQO não são fotométricos, como por exemplo: a) Sensor de DQO por Titulação (Método Standard): sensores baseados na titulação de amostras com reagentes químicos para determinar a quantidade de oxigênio consumido. Embora não envolvam a fotometria, eles ainda são amplamente usados devido à precisão nas medições de DQO em laboratórios; b) Sensores Eletroquímicos de DQO: sensores baseados em técnicas eletroquímicas para medir a DQO de águas e efluentes. Estes sensores funcionam medindo a corrente elétrica gerada durante a oxidação de substâncias químicas presentes nas amostras, oferecendo uma alternativa rápida e contínua para monitoramento de qualidade da água; c) Analísadores de DQO por Oxidação Térmica: usam altas temperaturas para oxidação total da matéria orgânica presente nas amostras. A quantidade de oxigênio necessário para realizar a oxidação é então calculada, e a DQO é determinada. Este método é muito utilizado para análises em laboratórios e em processos industriais.

Esses sensores não utilizam princípios fotométricos, mas são igualmente importantes para o monitoramento da qualidade da água e efluentes. Porém devido ao foco deste estudo ser a viabilidade de um sensor fotométrico, o foco dos próximos tópicos será baseado neste tipo de sensor.

2.3.3.1. O Sensor Viomax CAS51D

O sensor VIOMAX CAS51D, fabricado pela empresa Endres Hauser, é um sensor fotométrico projetado para realizar medições de nitratos e cargas orgânicas em geral, como carbono orgânico total (TOC), DQO e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), com base no Coeficiente de Absorção Espectral (SAC).

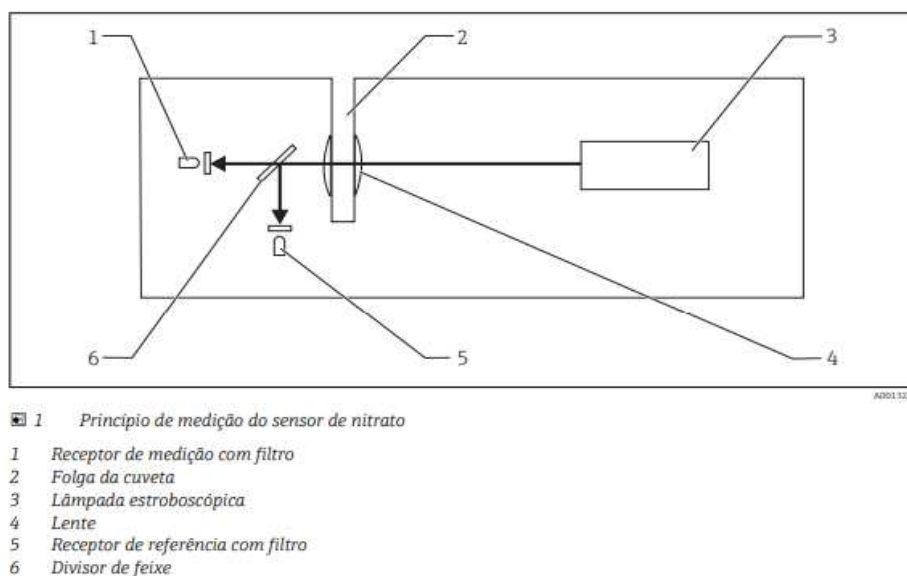
Este sensor acompanha um sistema de limpeza com ar comprimido, o que garante a ausência de impurezas indesejadas que poderiam interferir nas análises (ENDRESS HAUSER BRASIL, 2020). O método de medição funciona pela emissão de um feixe de luz, que pode ser na região UV ou visível, dependendo da faixa analítica do equipamento. O feixe de luz, pulsante, é dividido e direcionado para dois receptores com filtros (1 e 5).

Um receptor determina a intensidade da luz no comprimento de onda de 254 nm, enquanto, o outro mede a intensidade no comprimento de onda de 550 nm. A análise é realizada a partir da razão entre as medições desses dois receptores, e o resultado é convertido em valor de DQO utilizando curvas de calibração pré-determinadas no aparelho (ENDRESS HAUSER, 2021; ENDRESS HAUSER, 2020a).

Os compostos orgânicos que podem absorver a radiação nas faixas de comprimento de onda que o equipamento utiliza (UV-Vis) incluem cromóforos de compostos orgânicos, como álcoois, éteres, aminas, compostos de enxofre, alcenos, alcinos e compostos carboxílicos, que são comumente encontrados nos efluentes (CARVALHO, 2018).

A Figura 6 mostra a estrutura do sensor Viomax CAS51D, destacando as partes essenciais para seu funcionamento. O efluente a ser analisado passa pela folga da cubeta (2), que deve estar completamente imersa e com seu ângulo de 0°, mantendo a abertura paralela ao fluxo do efluente. Isso evita a formação de bolhas de ar e garante uma análise mais precisa, pois a luz será absorvida no comprimento de onda previamente determinado (ENDRESS HAUSER, 2020).

Figura 6 - Função e projeto do sistema do equipamento Viomax CAS51D



Fonte: Endress, Hauser (2020)

Entre as vantagens desse equipamento, destaca-se a significativa redução no tempo de análise, uma vez que a medição é realizada *online*, proporcionando resultados instantâneos, que são expressos na unidade de medida da análise em seu *liquiline*. O sistema permite a realização de outras análises em paralelo à de DQO, com o mesmo equipamento. Além disso, a tecnologia reduz o uso de reagentes químicos, o que diminui os impactos ambientais e aumenta a agilidade na tomada de decisões nos processos industriais (ENDRESS HAUSER, 2020b). O sensor pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7- Sensor Viomax CAS51D



Fonte: Endress, Hauser (2020)

O sensor fotométrico Viomax CAS51D, desenvolvido pela Endress Hauser, emprega a técnica de absorção de luz UV-Vis para determinar a DQO em efluentes industriais. Esse método se baseia na interação de compostos orgânicos com a radiação ultravioleta (UV) e

visível, especialmente na faixa de 254 nm, onde muitos compostos orgânicos presentes em águas residuais absorvem luz de forma significativa.

A oxidação desses compostos, por sua vez, está intimamente relacionada à medição da DQO, que quantifica o oxigênio consumido na oxidação de materiais orgânicos presentes no efluente. Diversos estudos da literatura abordam os tipos de compostos que são oxidados por esse método e como eles influenciam os resultados da análise de DQO (ZHANG *et al.*, 2016).

Estudos sobre fotoeletrocatalise, como os realizados por Zhang, Chang e Chen (2016), demonstram que compostos orgânicos, como álcoois e ácidos carboxílicos, podem ser eficientemente oxidados quando expostos à radiação UV.

O processo de fotoeletrocatalise, que utiliza materiais como TiO_2 para a oxidação de contaminantes orgânicos, é uma metodologia complementar que também se baseia na interação de compostos com luz UV. Essa abordagem reforça a ideia de que muitos compostos orgânicos presentes em efluentes podem ser oxidados de maneira eficaz sob radiação UV, resultando em um aumento da DQO.

De acordo com Carvalho (2018), compostos orgânicos como álcoois, ácidos carboxílicos, aminas, éteres e compostos de enxofre são exemplos típicos de substâncias que possuem cromóforos e absorvem radiação UV, particularmente na região de 254 nm.

A absorção dessa radiação é essencial para a medição da DQO, pois reflete a presença de compostos que são oxidados durante o processo. O autor destaca que a interação desses compostos com a luz UV resulta em uma mudança de intensidade de absorção que é registrada pelo sensor fotométrico.

Carmo (2021) complementa essa visão, apontando que compostos orgânicos de diversas naturezas, incluindo álcoois, compostos aromáticos e ácidos carboxílicos, são comumente encontrados em efluentes industriais e apresentam absorção significativa na faixa UV-Vis.

Esses compostos, quando oxidados, consomem oxigênio, o que contribui diretamente para o aumento da DQO. A análise fotométrica baseada em absorção de luz nessas faixas espectrais proporciona uma maneira rápida e eficiente de avaliar a carga orgânica dos efluentes, especialmente em sistemas que necessitam de monitoramento contínuo.

Portanto, a literatura revela que compostos orgânicos de diversas classes, como álcoois, ácidos carboxílicos, aminas, éteres e compostos aromáticos, são comumente oxidados durante a análise de DQO usando sensores fotométricos. A absorção de luz UV, especialmente na faixa de 254 nm, é uma característica essencial para detectar esses compostos, e a oxidação deles está diretamente associada ao consumo de oxigênio, o que caracteriza a DQO dos efluentes.

Essa abordagem fotométrica oferece uma ferramenta eficaz para o monitoramento

contínuo da carga orgânica em efluentes industriais, com base na interação da luz UV com os compostos presentes na amostra.

Muitos desses compostos orgânicos possuem cromóforos (grupos funcionais que absorvem luz em faixas específicas do espectro eletromagnético, especialmente na região de 254 nm). Essa faixa é de particular interesse, pois corresponde à absorção característica de diversos compostos presentes em efluentes industriais (Oliveira *et al.*, 2020).

A intensidade da absorção de luz nesses comprimentos de onda pode ser correlacionada diretamente com a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação dos compostos orgânicos, dado que a quantidade de luz absorvida é proporcional à concentração desses compostos na amostra. (SKOOG *et al.*, 2014).

Essa relação direta entre absorção óptica e consumo de oxigênio é explorada em sensores fotométricos, como o Viomax CAS51D. O equipamento oferece diferentes comprimentos de caminho óptico (1 mm, 2 mm e 5 mm), permitindo abranger faixas de medição de DQO entre 0 e 75 mg/L, 0 e 375 mg/L e 0 e 1500 mg/L, respectivamente, conforme a necessidade da aplicação (ENDRESS+HAUSER, 2024).

Além disso, o sensor apresenta um desvio padrão típico de 1% a 3% do valor medido, dependendo das condições do efluente (ENDRESS+HAUSER, 2024). Embora o fabricante não informe diretamente os limites de detecção (LD) e limites de quantificação (LQ) no material técnico simplificado, é reconhecido que os sensores UV como o Viomax possuem limites de detecção adequados para aplicações industriais em controle de carga orgânica (LIU *et al.*, 2019).

A capacidade dos sensores fotométricos de estimar a DQO está fundamentada na presença de compostos orgânicos que absorvem intensamente a radiação na faixa do ultravioleta (UV) e que são facilmente oxidados. A relação entre a quantidade de luz absorvida e a demanda de oxigênio é estabelecida por meio de uma curva de calibração, construída a partir da análise de amostras com DQO conhecida, determinadas previamente por métodos padrão, como o método do dicromato.

A partir dessa calibração, o sensor é capaz de correlacionar a intensidade da absorção UV com a concentração estimada de matéria orgânica oxidável presente na amostra. Essa abordagem permite o monitoramento contínuo e em tempo real da qualidade dos efluentes, sendo especialmente útil em ambientes industriais que exigem respostas rápidas e precisas (ENDRESS+HAUSER, 2024).

Assim, o uso da absorção UV-Vis como indicador para a determinação da DQO oferece uma abordagem eficiente e de baixo custo, contribuindo significativamente para o controle

ambiental de efluentes industriais e o atendimento a normas ambientais cada vez mais rigorosas (GONZALEZ, RIVAS, RODRÍGUEZ, 2015).

Embora o sensor fotométrico, como o VIOMAX CAS51D, apresente vantagens operacionais expressivas (análise em tempo real, ausência de reagentes e potencial de automação), ele também possui limitações importantes que devem ser consideradas na sua aplicação industrial.

Uma das principais restrições está relacionada à interferência óptica provocada por compostos inorgânicos presentes no efluente, especialmente aqueles que também apresentam absorção significativa na faixa de 254 nm (como nitratos, alguns compostos aromáticos halogenados ou complexos metálicos). Esses interferentes podem superestimar os valores de DQO registrados pelo sensor, comprometendo a precisão da análise se não houver uma calibração adequada para a matriz específica.

Além disso, a presença de partículas em suspensão, turbidez elevada ou formação de biofilme na lente do sensor pode afetar a leitura da absorvância e gerar resultados inconsistentes. Embora sensores como o VIOMAX disponham de sistemas de autolimpeza (ex.: jato de ar comprimido), sua eficácia depende da manutenção regular e do correto posicionamento do equipamento na linha de processo.

Outro aspecto crítico refere-se à dependência de curvas de calibração (ou curvas analíticas) específicas para o tipo de efluente analisado. Como a técnica de absorção UV/VIS é sensível às características químicas e físicas da amostra — especialmente à presença, natureza e concentração dos compostos orgânicos — cada matriz de efluente pode apresentar um perfil espectral distinto. Dessa forma, a curva de calibração utilizada pelo sensor fotométrico deve ser construída com base em amostras representativas da matriz específica que se deseja monitorar, correlacionando a absorbância medida (por exemplo, em 254 nm) com os valores reais de DQO obtidos por métodos padrão, como o método do dicromato.

Alterações na composição do efluente ao longo do tempo, como as causadas por mudanças sazonais, variações na matéria-prima ou troca de linha de produção, podem modificar significativamente o perfil de absorção da amostra. Isso exige a recalibração periódica do sensor para garantir que as leituras de DQO permaneçam confiáveis e representativas da carga orgânica real. Caso contrário, o sensor pode gerar leituras subestimadas ou superestimadas, comprometendo o controle do processo e o atendimento aos limites legais de lançamento. Assim, a curva de calibração não é estática: trata-se de um parâmetro crítico que deve ser continuamente validado conforme as mudanças na matriz de efluente monitorada.

Por fim, sensores fotométricos não detectam compostos que não absorvem na faixa

UV/Vis, como certos álcoois alifáticos ou açúcares, o que significa que uma parte da carga orgânica pode não ser mensurada. Portanto, o sensor deve ser visto como uma ferramenta complementar ao método tradicional, especialmente eficaz para monitoramento contínuo, mas com limitações que requerem validação prévia em matrizes complexas.

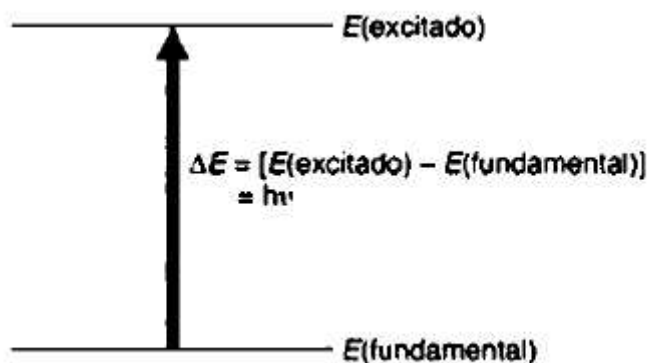
2.3.4. Espectrofotometria UV/VIS

Segundo Vogel (2011), os métodos espectrométricos, no geral, são dependentes da quantidade de energia que um determinado comprimento de onda é absorvido ou emitido pela amostra. Isso se dá pelo fato dos íons passarem de seu estado fundamental (de mais baixa energia), para seu estado excitado (estado de mais alta energia).

No presente trabalho, o foco será dado a espectrofotometria na região do ultravioleta/visível pois os métodos discutidos trabalham nesta faixa.

A Figura 8 representa essa transição de estados que ocorre quando um íon absorve uma determinada radiação em seu processo de excitação.

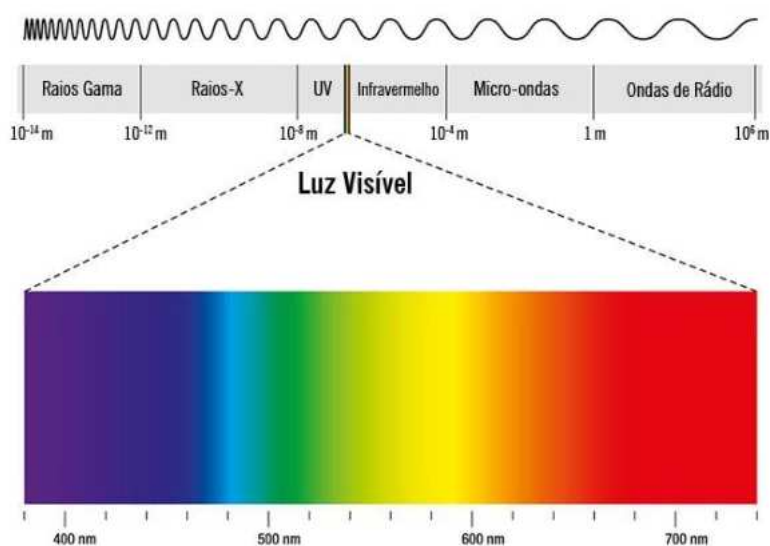
Figura 8 - Processo de Excitação



Fonte: Paiva *et al.*, 2015

Essa absorção pode ocorrer em diferentes regiões do espectro eletromagnético, podendo ser: Raios X, Gama (absorve na faixa menor do que 0,1 nm), raios x (0,1 nm a 10 nm), Ultravioleta (10 nm a 400 nm), Visível (400 nm a 800 nm), Infravermelho (800 nm e menor que 1 nm) e microondas e ondas de rádio, como demonstra a Figura 9 (PAIVA *et al.*, 2015).

Figura 9 - Faixas do Espectro Eletromagnético



Fonte: TODAMATÉRIA. Espectro eletromagnético. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/>. Acesso em: 24 maio 2025.

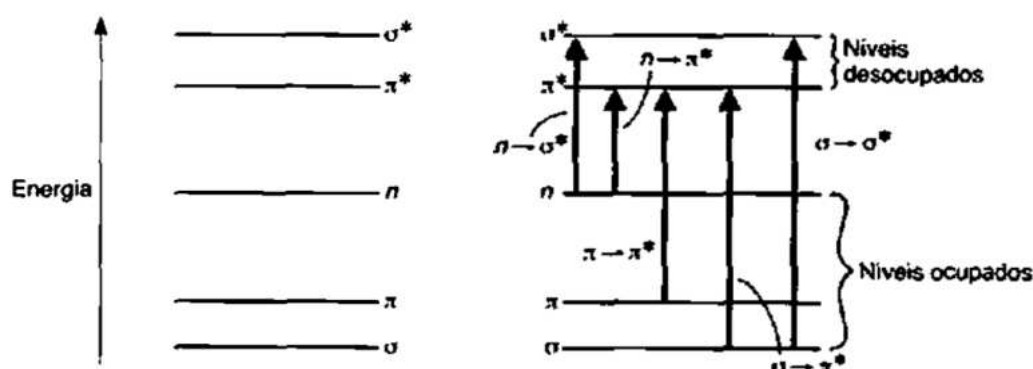
Dispondo do fato de que a região do ultravioleta e visível é o foco deste trabalho, haverá um aprofundamento maior no conceito destas faixas do espectro frente às outras.

A transição de energia da faixa do ultravioleta é visível, ocorre em nível eletrônico de forma que quando uma molécula absorve energia o elétron vai do orbital HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) para um orbital LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). Sendo HOMO o orbital de mais alta energia ocupado por elétrons e LUMO o orbital molecular de menor energia que não contém elétrons (PAIVA *et al.*, 2015).

Em grande parte das moléculas, orbitais σ (sigma) são os orbitais ocupados de mais baixa energia de uma molécula e orbitais π tem um nível de energia mais alto tendo como mais alto nível de energia entre esses o orbital n que são os orbitais não ligantes.

Tendo em vista os orbitais desocupados, pode-se citar os orbitais π^* e σ^* como os orbitais de mais alto nível de energia. A Figura 10 demonstra as possíveis transições energéticas da região do ultravioleta e visível (PAIVA *et al.*, 2015).

Figura 10 - Transições Energéticas



Fonte: Paiva *et al* (2015)

A técnica de espectrofotometria na região do UV/Vis se baseia na capacidade de absorção dos grupos cromóforos existentes em um composto (HARRIS, 2012). Os cromóforos são os grupos de átomos responsáveis pela absorção de luz em uma molécula, sendo essa a parte da molécula que ocorre as transições eletrônicas anteriormente citadas.

Essa fração da molécula tem a capacidade de absorver radiação incidida, sendo assim, o grupo cromóforo de uma molécula é de extrema importância para a espectrofotometria (PAIVA *et al.*, 2015).

É importante salientar que, caso os cromóforos tenham alguma modificação, seja ela estrutural da molécula ou pelo solvente no qual está inserido, o mesmo pode alterar o comprimento de onda absorvido, pois esses fatores podem modificar a transição energética que ocorre nos cromóforos (GOUVEIA-MATOS, 1999).

A energia utilizada para movimentar os elétrons entre os orbitais HOMO e LUMO pode ser quantificada pela radiação absorvida pelo grupo cromóforo da molécula, sendo essa medida a absorvância que pode estar diretamente ligada a concentração desta amostra pela Lei de Beer (PAIVA *et al.*, 2015).

A Lei de Beer é fundamental para a espectrofotometria na região do UV/Vis pois ela descreve a relação entre a absorvância e a concentração de uma molécula, como pode ser observada pela equação 2 (LIMA, 2013).

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l$$

Equação 2

Onde:

A absorvância;

ε absortividade molar ($\text{mol}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1}$);

c concentração molar da espécie em solução (mol.m^{-3});

l distância percorrida pela radiação através da solução (m).

Apesar de ser amplamente utilizada, essa lei necessita obedecer a condições para se manter válida, sendo as principais: a radiação deve ser monocromática, as moléculas (átomos ou íons) devem absorver a luz de forma independente entre si, a solução a ser analisada não pode dispersar radiação (LIMA, 2013).

É válido salientar que tal conceito não é válido para compostos fluorescentes e compostos que são modificados pela irradiação presente. Além de não ser utilizada em soluções com concentrações maiores do que 0,01M e quando há um equilíbrio entre diferentes formas de moléculas a serem absorvidas (PAIVA, 2015).

Dessa forma, é possível realizar medições precisas da DQO utilizando equipamentos como espectrofotômetros, os quais, com base nos conceitos anteriormente apresentados, são capazes de realizar essa análise por meio da absorvância da molécula em estudo.

A adequação do sensor fotométrico para matrizes com alta carga orgânica ou elevada turbidez depende de algumas considerações técnicas relacionadas à forma como a análise é realizada.

O sensor fotométrico, como o VIOMAX CAS51D, opera com base na medição da absorvância da luz ultravioleta em 254 nm, o que o torna particularmente sensível à presença de compostos orgânicos com estruturas aromáticas ou ligações duplas conjugadas, características comuns em corantes, fragrâncias e certos surfactantes presentes nos efluentes industriais. Nesse sentido, o equipamento demonstra bom desempenho em matrizes com alta carga orgânica, uma vez que muitos desses compostos apresentam grupos cromóforos que absorvem eficientemente a radiação UV, possibilitando leituras precisas e em tempo real.

No entanto, a presença de elevada turbidez ou sólidos suspensos pode interferir na precisão das medições, uma vez que partículas dispersas na amostra podem causar espalhamento da luz, afetando a absorvância registrada pelo sensor.

Para mitigar esse efeito, o sensor VIOMAX CAS51D conta com sistema de limpeza por ar comprimido e exige instalação em pontos de fluxo constante, com a cubeta completamente imersa e sem bolhas, garantindo que a leitura ocorra em um caminho óptico limpo. Em efluentes muito turvos, pode ser necessária a implementação de pré-tratamentos simples, como decantação ou filtração física, antes da leitura, a fim de evitar leituras sub ou superestimadas.

Dessa forma, o sensor fotométrico é tecnicamente adequado para aplicações em matrizes com alta carga orgânica, especialmente aquelas ricas em compostos cromóforos. No

caso de efluentes com alta turvação, a sua eficácia depende da qualidade da instalação e da manutenção do sistema de leitura óptica, sendo recomendável avaliar a necessidade de adaptações para garantir a confiabilidade dos resultados.

Do ponto de vista regulatório, os sensores fotométricos ainda não substituem oficialmente os métodos padrão reconhecidos por órgãos ambientais como o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) ou pelas diretrizes do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

A Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece condições e padrões para o lançamento de efluentes, exige que os parâmetros de controle, como a DQO, sejam determinados por métodos oficialmente aceitos, sendo o método com dicromato de potássio em meio ácido o principal procedimento de referência.

Contudo, sensores ópticos como o VIOMAX CAS51D vêm sendo progressivamente utilizados de forma complementar ao método colorimétrico, especialmente em contextos industriais que demandam monitoramento contínuo, automação e respostas em tempo real. Embora ainda não sejam aceitos como substitutos diretos em relatórios oficiais de conformidade ambiental, esses sensores são amplamente adotados no controle interno de processos, possibilitando intervenções mais ágeis para garantir que os efluentes atendam aos limites legais antes mesmo da validação laboratorial por métodos convencionais.

Dessa forma, o uso de sensores fotométricos deve ser compreendido, no contexto atual, como uma ferramenta de apoio à gestão ambiental e ao controle de qualidade, não como um substituto normativo. Para que venham a ser reconhecidos como métodos oficiais, é necessário que haja validação metrológica padronizada e revisão das normativas técnicas pelos órgãos reguladores. Enquanto isso, sua aplicabilidade industrial segue em expansão, contribuindo significativamente para a eficiência e sustentabilidade do tratamento de efluentes, mesmo que ainda dependa da complementação por métodos laboratoriais reconhecidos para fins legais.

2.3.5. Calibração do Sensor Fotométrico Viomax CAS51D

A calibração de sensores analíticos é uma etapa fundamental para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados gerados em análises ambientais e industriais. No caso do sensor fotométrico Viomax CAS51D, essa etapa se torna ainda mais relevante, uma vez que o equipamento é utilizado para a determinação de parâmetros críticos como a Demanda Química de Oxigênio (DQO) em tempo real (GUIMARÃES; ZAIAT, 2020). A operação correta do sensor depende diretamente da adequação da sua resposta óptica às características específicas

do efluente analisado, sendo a calibração responsável por alinhar essa resposta aos valores reais de concentração de carga orgânica (OLIVEIRA; VILLAS BÔAS; ZAIAT, 2018).

O processo de calibração consiste basicamente na exposição do sensor a soluções padrão com concentrações conhecidas de DQO. A partir dessas amostras, o equipamento registra os sinais de absorvância na faixa de 254 nm, que são correlacionados com os valores teóricos, gerando uma curva de calibração (ENDRESS HAUSER, 2020). Essa curva é essencial para a conversão dos sinais ópticos em valores quantitativos de DQO e deve ser ajustada com base na matriz real do efluente a ser monitorado (APHA; AWWA; WEF, 2017).

O Viomax CAS51D conta com curvas de calibração de fábrica, pré-programadas no sistema Liquiline, que fornecem valores de referência baseados em compostos orgânicos genéricos comumente encontrados em águas residuárias (ENDRESS HAUSER, 2020). No entanto, em processos industriais específicos, como os da indústria de cosméticos, a composição do efluente pode apresentar grande variabilidade em função de pigmentos, surfactantes, silicones, conservantes e fragrâncias, entre outros compostos de baixa biodegradabilidade (SILVA; FERREIRA, 2021). Nesses casos, é fortemente recomendada a construção de curvas de calibração personalizadas, baseadas em amostras coletadas no próprio processo e analisadas paralelamente pelos métodos tradicional e alternativo (APHA; AWWA; WEF, 2017).

A construção de curvas locais permite não apenas o ajuste dos coeficientes de correção, mas também a compensação de possíveis interferências ópticas causadas por turbidez, coloração residual, presença de óleos ou variações de pH, que afetam diretamente a leitura espectrofotométrica (OLIVEIRA; VILLAS BÔAS; ZAIAT, 2018). Além disso, o uso de amostras reais proporciona maior confiabilidade nas leituras obtidas em campo, garantindo a equivalência entre os métodos de medição e reduzindo desvios sistemáticos (GUIMARÃES; ZAIAT, 2020).

A calibração do sensor deve seguir uma periodicidade definida com base na rotina operacional da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). De acordo com o fabricante, recomenda-se a verificação semanal dos sinais de leitura e a calibração formal em intervalos mensais ou após eventos críticos, como troca de peças, limpeza do sensor, alterações de temperatura ou variações bruscas na composição do efluente (ENDRESS HAUSER, 2020). O Viomax CAS51D permite que a calibração seja realizada de forma automática ou manual, dependendo da configuração do sistema. A calibração automática, por sua vez, requer o uso de padrões estáveis e soluções de referência isentas de interferentes, enquanto a calibração manual demanda maior atenção do operador, sobretudo na construção e validação da curva (CARMO,

2021).

É importante destacar que falhas na calibração comprometem diretamente a exatidão das medições, podendo levar à subestimação ou superestimação dos valores de DQO. Isso implica em riscos operacionais e ambientais, como o não cumprimento dos limites legais de lançamento de efluentes, perda de eficiência nos processos de tratamento e decisões equivocadas na gestão ambiental (GUIMARÃES; ZAIAT, 2020). Além disso, a ausência de uma calibração adequada compromete a rastreabilidade analítica, dificultando auditorias técnicas e o cumprimento de normas de certificação, como a ISO 14001 (OLIVEIRA; VILLAS BÔAS; ZAIAT, 2018).

Segundo a literatura técnica, a calibração periódica de sensores ópticos deve ser considerada parte integrante do controle da qualidade analítica e não uma etapa pontual do processo de medição (GUIMARÃES; ZAIAT, 2020). A confiabilidade dos resultados depende da estabilidade das condições operacionais e da adequação da curva de calibração à realidade do sistema monitorado. Em ambientes industriais com alta variabilidade de carga orgânica, como os observados na produção cosmética, essa calibração deve ser continuamente revista e atualizada, considerando as mudanças sazonais, alterações de linha de produção ou adoção de novos insumos químicos (SILVA; FERREIRA, 2021).

Portanto, a calibração do sensor Viomax CAS51D representa um passo essencial para a consolidação de seu uso como alternativa eficaz, rápida e sustentável ao método tradicional com dicromato de potássio. A associação entre tecnologia óptica, protocolos robustos de calibração e validação sistemática assegura a equivalência analítica entre os métodos e contribui significativamente para o aprimoramento das práticas de monitoramento ambiental em tempo real (APHA; AWWA; WEF, 2017; CARMO, 2021).

2.4. COMPARAÇÃO ANALÍTICA DE MÉTODOS

A comparação e validação de métodos analíticos são etapas fundamentais para garantir que os resultados obtidos sejam confiáveis, reproduzíveis e tecnicamente adequados ao propósito pretendido. De acordo com a Resolução RE nº 166/2017 da ANVISA, “a validação de métodos é o processo por meio do qual se estabelece, por meio de estudos laboratoriais, que um determinado procedimento analítico é adequado ao seu propósito” (ANVISA, 2017, p. 7).

Essa abordagem visa assegurar a integridade dos dados analíticos, especialmente quando se pretende substituir um método colorimétrico, como o com dicromato de potássio, por uma alternativa tecnológica, como o sensor fotométrico.

A exatidão é um dos parâmetros mais importantes em um processo de validação, pois se refere à proximidade entre o resultado obtido e o valor verdadeiro ou aceito como referência. Esse parâmetro é geralmente avaliado por meio da recuperação de analitos adicionados à matriz da amostra e expressa em termos percentuais. A ANVISA (2017) destaca que a exatidão é um indicativo da ausência de viés sistemático e pode ser comprovada por comparação com métodos validados de referência ou materiais certificados.

A precisão, por sua vez, está relacionada à reprodutibilidade dos resultados sob as mesmas condições analíticas. Ela pode ser dividida em repetibilidade (quando as análises são realizadas sob as mesmas condições em curto intervalo de tempo) e reprodutibilidade intermediária (que envolve variações como dias distintos, operadores diferentes ou equipamentos diversos) (ICH, 2005).

Segundo a ANVISA (2017), a precisão deve ser expressa pelo desvio padrão relativo (RSD%) e, para a maioria das análises ambientais, valores inferiores a 5% são considerados aceitáveis.

Outro parâmetro fundamental é a linearidade, que verifica se o método é capaz de gerar resultados diretamente proporcionais à concentração do analito, dentro de uma faixa definida. Essa verificação é feita por meio da análise da curva de calibração (ou curva analítica), e seu grau de ajuste é avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2).

Como explicam Mendes, Ferreira e Lima (2020), a linearidade assegura que qualquer variação na concentração da substância analisada se reflita proporcionalmente na resposta instrumental, o que é essencial em análises quantitativas.

O limite de detecção (LD) e o limite de quantificação (LQ) são parâmetros que determinam, respectivamente, a menor quantidade de analito que pode ser detectada e a menor que pode ser quantificada com exatidão e precisão aceitáveis. Ambos são estimados com base na razão entre o desvio padrão da linha de base e a inclinação da curva analítica, sendo 3 vezes essa razão para o LD e 10 vezes para o LOQ (ANVISA, 2017).

Conforme apontam Rodrigues e Lima (2018, p. 156), em análises ambientais como a DQO, esses parâmetros são cruciais, principalmente para detecção de compostos em baixas concentrações em efluentes tratados.

A robustez é outro aspecto a ser considerado, pois avalia a capacidade do método de manter a qualidade dos resultados mesmo diante de pequenas variações nos parâmetros operacionais, como temperatura, pH ou tempo de reação.

Para a ANVISA (2017, p. 12), “a robustez é avaliada por meio da análise de resultados após alterações controladas em variáveis críticas do método”. Esse parâmetro é de extrema

relevância em ambientes industriais, onde as condições de operação nem sempre são ideais e constantes.

Por fim, a especificidade refere-se à habilidade do método de medir exclusivamente o analito de interesse, mesmo na presença de outros componentes na matriz da amostra. Essa característica é especialmente importante em amostras complexas como efluentes industriais, que contêm uma grande variedade de substâncias orgânicas e inorgânicas.

Como explicam Skoog *et al.* (2014, p. 78), a especificidade garante que a resposta obtida seja atribuída apenas ao composto-alvo. No caso da DQO, o método tradicional pode superestimar os resultados por oxidar substâncias inorgânicas redutoras, enquanto o sensor fotométrico pode ser afetado por absorção de compostos como nitratos e sais metálicos na faixa UV (254 nm), exigindo calibração cuidadosa.

Esses parâmetros (exatidão, precisão, linearidade, limites de detecção e quantificação, robustez e especificidade) constituem o núcleo de qualquer processo de validação de método analítico. Sua consideração sistemática é indispensável para que se possa comparar de forma justa dois métodos distintos, como o método tradicional e o método alternativo, empregando o sensor fotométrico, e para garantir que a nova abordagem seja tecnicamente sólida e regulamentariamente aceitável para o uso em processos industriais contínuos.

2.4.1 Comparação Qualitativa dos Métodos para Análise de DQO

A escolha do método mais adequado para a determinação da DQO deve considerar uma série de fatores práticos e analíticos. A comparação entre o método tradicional, baseado na oxidação química por dicromato de potássio, e o método alternativo via sensor fotométrico, como o VIOMAX CAS51D, revela diferenças substanciais em termos de princípios operacionais, segurança, tempo de resposta, custo e aplicabilidade à matriz de efluentes da indústria cosmética.

O sensor fotométrico VIOMAX CAS51D realiza a análise em tempo real com base na absorção de luz ultravioleta a 254 nm. Esse comprimento de onda é característico de compostos orgânicos que possuem sistemas conjugados de elétrons (como anéis aromáticos), o que torna o método eficiente para detectar substâncias cromóforas presentes nos efluentes industriais. A leitura ocorre de forma automatizada, sem necessidade de preparo prévio da amostra, digestão química ou uso de reagentes, o que reduz significativamente o tempo de resposta e o custo por análise ao longo do tempo.

A seguir, apresenta-se um quadro comparativo (Quadro 1) entre os dois métodos,

destacando suas vantagens e limitações práticas:

Quadro 1 – Comparação qualitativa entre os métodos tradicional e alternativo para análise de DQO

Critério	Método de Referência (Método Colorimétrico)	Método Alternativo (Sensor Fotométrico UV, em 254 nm)
Princípio de funcionamento	Oxidação com Cr^{6+} (dicromato) em meio ácido	Absorbância UV por cromóforos orgânicos
Compostos orgânicos analisados	Ampla gama de compostos oxidáveis: álcoois, ácidos, açúcares, detergentes, fenóis, entre outros. Inclui substâncias inorgânicas redutíveis (interferentes).	Apenas compostos orgânicos com estruturas conjugadas (ex: aromáticos, insaturados, alguns ácidos húmicos).
Tempo de análise	2 a 6 horas (digestão + leitura fotométrica)	Tempo real (resposta em segundos a minutos)
Uso de reagentes perigosos	Sim – dicromato (Cr^{6+}), ácido sulfúrico, sulfato de mercúrio	Não – método livre de reagentes
Geração de resíduos	Alta – resíduos tóxicos e corrosivos (cromo, mercúrio)	Muito baixa – não gera resíduos químicos
Sensibilidade à matriz	Alta – oxida compostos diversos, inclusive interferentes	Média – interferência óptica de sais, sólidos e corantes
Facilidade de operação	Baixa – exige preparo químico, vidrarias e laboratório	Alta – operação automatizada e interface digital
Custo por análise	Alto – consumo de reagentes, tempo e mão de obra especializada	Baixo – custo operacional reduzido após aquisição do equipamento
Portabilidade / uso em campo	Inexistente – análise restrita ao ambiente laboratorial	Alta – instalação em linha e monitoramento contínuo

Fonte: APHA; AWWA; WEF (2017); NBR 10236 (2018)

O Quadro 1 compara o método colorimétrico de determinação de DQO, baseado na oxidação com dicromato de potássio, com o sensor fotométrico VIOMAX CAS51D, que utiliza tecnologia de absorvância UV. Em contrapartida, o sensor VIOMAX realiza medições em tempo real, com resposta em segundos a minutos, dispensando reagentes e reduzindo significativamente a geração de resíduos. Isso o torna uma alternativa ambientalmente mais segura e operacionalmente eficiente.

No aspecto técnico-operacional, o sensor fotométrico apresenta maior facilidade de uso, por ser automatizado e digital, além de permitir instalação em linha para monitoramento contínuo, o que favorece seu uso em campo. Embora tenha sensibilidade média à matriz, com

possíveis interferências ópticas, seu custo por análise é reduzido após a aquisição inicial. Já o método com dicromato, embora altamente sensível e amplamente validado, possui custo elevado por análise e não é viável fora do ambiente laboratorial. Assim, a escolha entre os métodos deve considerar o contexto de aplicação, necessidade de mobilidade, tempo de resposta e preocupações ambientais.

Do ponto de vista econômico e operacional, a adoção de sensores fotométricos como o VIOMAX CAS51D representa uma alternativa estratégica ao método tradicional baseado na oxidação com dicromato de potássio. Embora o investimento inicial (CAPEX)¹ na aquisição do sensor seja superior ao custo de implantação do método convencional, os benefícios operacionais ao longo do tempo justificam essa escolha. O sensor proporciona uma expressiva redução nas despesas operacionais (OPEX)², principalmente pela eliminação do uso contínuo de reagentes tóxicos e corrosivos, pela diminuição da geração de resíduos perigosos e pela automatização do processo de monitoramento. O método tradicional, além de demandar estrutura laboratorial específica e mão de obra qualificada, possui tempo de análise elevado (4 a 6 horas), o que pode comprometer a eficiência de resposta nas estações de tratamento.

Em contrapartida, o sensor fotométrico permite medições em tempo real, com dados disponibilizados de forma contínua, o que favorece a tomada de decisões rápidas e eficazes no controle da qualidade do efluente.

Além disso, sua operação simplificada reduz a necessidade de intervenção manual, minimizando erros operacionais e otimizando recursos humanos. Quanto à viabilidade de implantação em estações de tratamento industriais, o sensor VIOMAX CAS51D apresenta vantagens importantes, como resistência a condições adversas do ambiente fabril, compatibilidade com sistemas de automação e manutenção facilitada por sistemas integrados de limpeza automática.

Tais características tornam sua adoção técnica e economicamente viável, especialmente em setores industriais que exigem controle rigoroso e contínuo dos parâmetros de lançamento de efluentes.

Dessa forma, o uso de sensores ópticos desponta como uma solução moderna e sustentável para o monitoramento da DQO, alinhando eficiência analítica, segurança operacional e conformidade ambiental.

¹ Sigla utilizada para Capital Expenditure, que em português significa (Despesas de Capitais), que se refere aos gastos realizados por uma empresa para adquirir, melhorar ou manter ativos físicos de longo prazo.

² Sigla para Operational Expenditure, que em português significa Despesa Operacional, que se refere aos gastos correntes de uma empresa para manter suas operações diárias.

Sob a perspectiva analítica, o método do dicromato de potássio é considerado referência por sua elevada reprodutibilidade e abrangência na oxidação de compostos orgânicos, mesmo os mais refratários à degradação. O agente oxidante utilizado, o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), em meio ácido e sob refluxo térmico, reage com praticamente todas as formas de matéria orgânica oxidável, convertendo-as em CO_2 e H_2O .

O consumo do agente oxidante é proporcional à quantidade de matéria orgânica na amostra, sendo posteriormente quantificado por titulometria ou espectrofotometria. Esse procedimento garante elevada sensibilidade e é recomendado por normas técnicas como a Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2017) e a NBR 9898 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1987).

Apesar de sua confiabilidade, o método com dicromato apresenta desvantagens significativas. O tempo total de análise pode ultrapassar duas horas, sem contar a preparação e digestão das amostras.

Além disso, o uso de substâncias tóxicas e perigosas como ácido sulfúrico, sulfato de prata e o próprio dicromato — um composto cancerígeno — impõe sérios riscos à saúde ocupacional e ao meio ambiente, exigindo manejo rigoroso de resíduos e sistemas de exaustão eficientes.

O custo operacional, por sua vez, tende a ser elevado devido à necessidade de insumos, equipamentos específicos e descarte seguro de resíduos. Ainda assim, esse método é o mais amplamente aceito para fins legais e regulatórios, servindo como padrão de validação para novas tecnologias.

Em contraste, o método baseado em sensores UV surgiu como uma alternativa promissora para aplicações em tempo real, oferecendo praticidade, rapidez e menor impacto ambiental.

O princípio desse método se baseia na absorção de radiação ultravioleta por compostos orgânicos presentes na amostra, especialmente aqueles com ligações duplas conjugadas, como os aromáticos.

A intensidade da radiação absorvida em comprimentos de onda específicos (geralmente entre 254 nm e 280 nm) é correlacionada à concentração de matéria orgânica, utilizando-se curvas de calibração geradas a partir de padrões sintéticos ou amostras reais. A vantagem dessa abordagem é a possibilidade de monitoramento contínuo e não destrutivo, reduzindo significativamente o tempo de resposta em processos industriais.

Entretanto, a principal limitação do método UV reside na seletividade da radiação, que nem sempre consegue captar todos os compostos presentes na amostra. Compostos saturados,

alcoóis, açúcares e alguns surfactantes, comumente encontrados em efluentes cosméticos, apresentam baixa absorção na faixa do UV, o que pode comprometer a exatidão do resultado.

Por isso, a calibração do sensor deve ser feita cuidadosamente, de preferência utilizando padrões compostos que reflitam a complexidade do efluente real. A manutenção preventiva dos sensores, a limpeza das janelas ópticas e a compensação de interferências por turbidez ou sólidos em suspensão também são fatores críticos para a confiabilidade da medição.

Do ponto de vista normativo e legal, o método UV ainda não substitui o método clássico do dicromato. A legislação ambiental brasileira, por exemplo, conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 430/2011, exige análises laboratoriais com base em metodologias reconhecidas e validadas, como as da ABNT e do Standard Methods. Assim, o sensor UV tem sido empregado mais como ferramenta de triagem e controle operacional do que como prova definitiva para fins legais, embora estudos recentes e iniciativas internacionais busquem validar sua aplicação formal em contextos específicos.

A comparação entre os dois métodos deve, portanto, considerar não apenas critérios técnicos, mas também aspectos econômicos, logísticos e ambientais. O método UV destaca-se pela sua contribuição à sustentabilidade, eliminando o uso de reagentes perigosos e minimizando a geração de resíduos tóxicos. Essa característica é particularmente relevante no contexto da economia circular e das boas práticas de gestão ambiental, favorecendo empresas que buscam certificações como ISO 14001 e adesão a políticas de ESG (Environmental, Social and Governance).

Apesar do investimento inicial mais alto relacionado à aquisição e calibração dos sensores, o retorno é compensado por menor demanda de mão de obra especializada, redução no consumo de insumos e maior capacidade de resposta às variações do processo produtivo.

Em ambientes industriais dinâmicos, como a indústria de cosméticos, que lida com formulações diversas, alterações frequentes na produção e exigência de padrões elevados de qualidade, o uso do sensor UV representa uma solução moderna, eficiente e ambientalmente consciente.

Ele permite o ajuste quase imediato dos parâmetros operacionais das estações de tratamento de efluentes (ETEs), prevenindo lançamentos indevidos e otimizando o uso de produtos químicos no tratamento.

A integração do sensor UV com sistemas de automação e inteligência artificial também tem potencial para transformar o gerenciamento ambiental, promovendo uma cultura de prevenção e melhoria contínua.

Todavia, é fundamental destacar que o método tradicional com dicromato mantém seu

papel insubstituível em auditorias ambientais, emissão de relatórios oficiais, processos judiciais e atendimento às exigências dos órgãos reguladores. Por sua exatidão e universalidade, ainda será a principal referência nas análises laboratoriais por um longo período, sobretudo quando se trata de validação de dados obtidos por outras metodologias.

Conclui-se que a adoção de ambos os métodos de forma complementar é a estratégia mais eficiente e segura, garantindo simultaneamente a confiabilidade dos dados analíticos e a agilidade no controle de processos. Em um cenário de crescente demanda por responsabilidade ambiental e inovação tecnológica, saber equilibrar tradição e modernidade nas práticas laboratoriais é um diferencial estratégico para empresas comprometidas com a qualidade, a sustentabilidade e a conformidade legal.

2.4.2. Aplicabilidade em Rejeitos da Indústria Cosmética

Os efluentes gerados pela indústria cosmética apresentam uma matriz extremamente complexa, o que influencia diretamente a escolha e o desempenho dos métodos analíticos utilizados para avaliação da carga orgânica, como a DQO. Segundo Silva *et al.* (2019), esses rejeitos são compostos majoritariamente por substâncias orgânicas de baixa biodegradabilidade, tais como tensoativos, corantes sintéticos, fragrâncias, conservantes, polímeros e álcoois graxos. A diversidade estrutural desses compostos, que inclui desde moléculas aromáticas com grupos funcionais redox até cadeias apolares de difícil degradação, confere aos efluentes uma natureza altamente heterogênea, o que compromete a precisão e a confiabilidade de métodos que não considerem essas especificidades.

Entre os principais compostos encontrados nesses rejeitos, destacam-se os surfactantes aniônicos e não-iônicos, como o lauril éter sulfato de sódio e a cocoamidopropilbetaína, que apresentam alta persistência no ambiente e estruturas parcialmente oxidadas, dificultando sua degradação completa. Também estão presentes corantes sintéticos, como o vermelho 40, azul brilhante e tartrazina, os quais possuem grupos azo e estruturas aromáticas estáveis com elevada absorvância nas faixas do ultravioleta (UV) e visível. Fragrâncias e conservantes fenólicos, como os parabenos e o triclosan, são igualmente relevantes, pois apresentam cromóforos que interagem fortemente com radiação UV e demonstram atividade redox significativa. Adicionalmente, substâncias como silicones (ex. dimeticona) e óleos derivados de ácidos graxos, por sua baixa polaridade e estrutura robusta, tendem a resistir à oxidação por métodos convencionais.

Por outro lado, sensores fotométricos como o VIOMAX CAS51D, que operam por meio

da medição da absorvância da luz UV a 254 nm, oferecem vantagens significativas em termos de tempo de resposta e segurança operacional. Conforme Oliveira, Villas Bôas e Zaiat (2018), esse tipo de sensor é especialmente sensível à presença de compostos aromáticos, como corantes e fragrâncias, que possuem cromóforos com forte absorção nessa faixa de comprimento de onda. No entanto, o método é limitado quando se trata de compostos que não absorvem significativamente em 254 nm, como surfactantes apolares, álcoois alifáticos e silicones, o que pode resultar em subestimações. Ainda segundo os autores, a presença de turbidez, bolhas de ar ou partículas em suspensão pode interferir na leitura óptica, exigindo a instalação de sistemas automáticos de limpeza e calibração frequente do sensor, principalmente quando operando em linha.

A técnica de absorção UV-Vis a 254 nm pode ser eficaz na detecção de uma ampla gama de compostos orgânicos presentes em efluentes, especialmente aqueles com características químicas que permitem transições eletrônicas e, portanto, absorvem luz ultravioleta. Contudo, essa técnica não é adequada para a medição de compostos inorgânicos ou de baixa absorção, o que pode levar a subestimativas da DQO quando esses compostos estão presentes em concentrações significativas.

A técnica, embora eficiente, possui algumas limitações. Primeiramente, ela não é sensível a compostos inorgânicos ou compostos não aromáticos, como os ácidos graxos e substâncias de baixo peso molecular que não contêm grupos absorventes a 254 nm. Costa e Barbosa (2025) explicam que "substâncias inorgânicas, como cloretos e sulfatos, que frequentemente estão presentes em efluentes industriais, não são detectadas pela absorção UV-Vis a 254 nm, o que pode subestimar a DQO em amostras que contêm essas substâncias".

Além disso, a técnica pode ser afetada pela presença de outros compostos orgânicos que absorvem em diferentes comprimentos de onda, criando interferências. A interferência é particularmente importante em efluentes industriais, onde a composição química pode ser complexa e variar com o tempo. Lima e Silva (2022) destacam que "compostos que absorvem em outras faixas de comprimento de onda, como 280 nm ou 350 nm, podem causar distorções nas medições de DQO, comprometendo a precisão dos sensores UV-Vis".

A calibração do sensor também é um ponto crítico. Para garantir a precisão das medições, é necessário calibrar o sensor com base nas características dos compostos predominantes no efluente analisado, o que pode ser um desafio em sistemas industriais com efluentes diversificados. A falta de calibração específica pode resultar em erros de estimativa da DQO, especialmente em ambientes dinâmicos (SOUZA; PEREIRA, 2023).

Portanto, a absorção UV-Vis a 254 nm representa uma ferramenta útil e rápida para a

estimativa de DQO em efluentes, mas deve ser utilizada com cautela, considerando suas limitações e a necessidade de calibração constante, principalmente em efluentes com perfis químicos variados.

Portanto, a aplicabilidade de cada método analítico está diretamente relacionada à finalidade da medição e à composição específica da amostra analisada. O método tradicional com dicromato, embora mais trabalhoso e gerador de resíduos perigosos, continua sendo a principal referência para fins de fiscalização ambiental, validação laboratorial e comparações normativas. Por outro lado, o sensor fotométrico se apresenta como uma ferramenta altamente eficaz para o monitoramento contínuo em tempo real, sendo particularmente útil no controle operacional de estações de tratamento e na rápida detecção de variações de carga orgânica. Como destaca Oliveira *et al.* (2018, p. 54), “a utilização combinada de sensores UV com métodos clássicos pode otimizar significativamente o gerenciamento ambiental de processos industriais complexos.”

Dessa forma, em ambientes industriais automatizados, como é o caso da indústria cosmética analisada neste estudo, a integração entre o sensor fotométrico e o método tradicional representa uma estratégia eficiente e complementar. O sensor atua como ferramenta de triagem, fornecendo dados instantâneos para ajustes operacionais, enquanto o método com dicromato fornece a validação periódica necessária para assegurar a conformidade com os padrões ambientais vigentes. Essa abordagem híbrida alia agilidade à precisão, garantindo tanto a eficiência do processo quanto a responsabilidade ambiental.

A indústria de cosméticos gera efluentes com composição orgânica altamente complexa e variável, contendo compostos como surfactantes, corantes sintéticos, fragrâncias e conservantes fenólicos, que influenciam diretamente o desempenho dos métodos analíticos de determinação da DQO. A escolha do método mais adequado depende da capacidade analítica frente às características físico-químicas da matriz em questão.

O método tradicional com dicromato possui a vantagem de oxidar uma ampla gama de compostos orgânicos, mesmo aqueles de baixa biodegradabilidade, como álcoois graxos, éteres e polímeros presentes em emulsões cosméticas. Surfactantes aniônicos e não-iônicos, como o lauril éter sulfato de sódio e a cocoamidopropilbetaína, são parcialmente oxidados por esse método, o que garante boa representatividade da carga orgânica. No entanto, essa reatividade abrangente também inclui substâncias inorgânicas redutoras, como íons ferroso (Fe^{2+}), nitrito (NO_2^-) e sulfeto (S^{2-}), que podem estar presentes nos efluentes e causar superestimções da DQO, como apontado por APHA; AWWA; WEF (2017). Além disso, compostos recalcitrantes, como silicones (ex. dimeticona) ou polímeros de alto peso molecular, não são completamente

oxidados, o que pode subestimar a carga real em determinadas amostras.

Por outro lado, o sensor fotométrico VIOMAX CAS51D, que opera na faixa do ultravioleta (254 nm), tem sua eficiência analítica limitada à detecção de compostos com grupos cromóforos, como corantes azo, compostos aromáticos e fragrâncias fenólicas. Substâncias como o vermelho 40, tartrazina, azul brilhante, bem como parabenos e triclosan, absorvem fortemente nessa faixa espectral, sendo prontamente detectadas. Contudo, compostos que não possuem estruturas conjugadas ou que apresentam baixa absorvância, como silicones, álcoois alifáticos e surfactantes apolares, podem não ser quantificados adequadamente, resultando em subestimações da carga orgânica real. Além disso, a presença de turbidez, emulsões ou bolhas de ar pode interferir na medição da absorvância, exigindo manutenção frequente do sensor e calibração específica para a matriz analisada (OLIVEIRA; VILLAS BÔAS; ZAIAT, 2018).

Portanto, os compostos típicos dos efluentes cosméticos exercem efeitos distintos sobre cada método. O método com dicromato continua sendo mais confiável para análises de referência, por sua ampla capacidade oxidativa, enquanto o sensor fotométrico é mais indicado para monitoramento rápido e contínuo, desde que as limitações quanto à seletividade espectral e interferência óptica sejam gerenciadas com protocolos adequados de calibração e manutenção.

A adequação do sensor fotométrico em matrizes com alta carga orgânica ou elevada turbidez representa uma preocupação prática relevante na indústria cosmética. Amostras com alta concentração de matéria orgânica geralmente apresentam coloração intensa, presença de sólidos em suspensão e emulsões estáveis, o que pode comprometer a acurácia da medição óptica baseada na transmitância de luz UV.

De acordo com Oliveira, Villas Bôas e Zaiat (2018), a presença de turbidez interfere diretamente na leitura da absorvância em 254 nm, pois reduz a passagem da radiação e pode gerar ruído óptico. Esse fenômeno é intensificado na presença de bolhas de ar, partículas coloidais e óleos emulsionados, elementos comuns nos rejeitos da indústria de cosméticos. Como consequência, o sensor pode apresentar leituras flutuantes, exigindo intervenções técnicas frequentes, como limpeza automatizada da janela óptica e calibração com padrões ajustados à matriz específica.

Além disso, embora o sensor tenha sensibilidade adequada para compostos aromáticos e cromóforos, sua resposta torna-se limitada diante de altas cargas de compostos que não absorvem na faixa de 254 nm, o que contribui para subestimações da DQO real. Segundo os mesmos autores, "a operação eficiente do sensor fotométrico depende não apenas da calibração, mas também de boas práticas de pré-tratamento da amostra, como filtração e diluição em linhas industriais com elevada carga orgânica" (OLIVEIRA; VILLAS BÔAS; ZAIAT, 2018).

Portanto, o sensor fotométrico pode ser utilizado com sucesso em sistemas de monitoramento em tempo real, desde que as características da amostra estejam dentro dos limites operacionais especificados pelo fabricante. Em condições adversas, como elevada turbidez e complexidade composicional, é recomendável que o sensor seja complementado por análises laboratoriais periódicas para garantir a confiabilidade dos dados gerados.

2.4.3. Análise Teórica e Estatística da Correlação entre os Métodos Tradicional e Sensorial na Determinação da DQO

Do ponto de vista comparativo, estudos teóricos e empíricos sugerem que há uma correlação positiva entre os resultados obtidos pelos dois métodos, embora esta não seja perfeita. Como discutido por Carmo (2021), sensores UV-VIS como o VIOMAX CAS51D tendem a detectar compostos orgânicos que absorvem na faixa de 254 nm, o que inclui corantes, fenóis e outras estruturas aromáticas, mas podem não responder de forma significativa a compostos alifáticos ou não cromóforos que são, por outro lado, oxidados no método com dicromato. Isso pode explicar eventuais discrepâncias entre os valores obtidos, principalmente em efluentes com composição química complexa, como os da indústria de cosméticos.

Com base em dados disponíveis na literatura e em estudos correlatos, como o de Guimarães e Zaiat (2020), pode-se hipotetizar que a correlação linear entre os métodos (se medida, por exemplo, com o coeficiente de Pearson) estaria em torno de 0,85 a 0,95, dependendo da composição do efluente e da calibração do sensor. Essa correlação elevada, ainda que não perfeita, indica que os dois métodos são estatisticamente comparáveis para fins de monitoramento contínuo, especialmente em processos industriais que exigem respostas rápidas e custo operacional reduzido.

Essa correlação também pode ser analisada em termos de sensibilidade analítica. O método tradicional possui limite de detecção típico em torno de 20 mg/L O₂ (APHA; AWWA; WEF, 2017), enquanto o sensor VIOMAX atinge valores de até 0,5 mg/L, conforme especificações do fabricante (ENDRESS+HAUSER, 2020). No entanto, essa sensibilidade é dependente da natureza dos compostos presentes: compostos como surfactantes alifáticos, frequentes em efluentes cosméticos, podem não ser detectados pelo sensor com a mesma eficiência.

Portanto, pode-se afirmar que os dois métodos apresentam forte correlação operacional e estatística, especialmente em faixas médias de concentração e em ambientes industriais onde os compostos aromáticos predominam. A escolha entre os métodos deve considerar o objetivo

da análise, os custos envolvidos, a necessidade de automação e a frequência de monitoramento. Enquanto o método com dicromato permanece como padrão para validação laboratorial, o sensor fotométrico se destaca como ferramenta estratégica para controle de processo em tempo real.

2.4.4. Repetibilidade e Sensibilidade dos Métodos

A análise da repetibilidade e sensibilidade dos métodos de determinação da DQO é fundamental para avaliar sua confiabilidade e adequação às exigências do monitoramento ambiental. Esses parâmetros influenciam diretamente a capacidade do método em gerar resultados consistentes e detectar pequenas variações na concentração de compostos orgânicos nos efluentes.

O método tradicional, colorimétrico com dicromato, descrito no procedimento 5220D do *Standard Methods* (APHA; AWWA; WEF, 2017), apresenta alta sensibilidade, com possibilidade de ajustes para faixas inferiores por meio de diluições e alteração da proporção de reagentes. Sua repetibilidade, quando executado sob condições controladas de digestão (tempo, temperatura e acidez), é considerada excelente. Entretanto, essa confiabilidade depende fortemente da habilidade do operador, da qualidade dos reagentes e da padronização rigorosa do procedimento analítico. Pequenas variações na titulação ou na leitura espectrofotométrica podem comprometer a precisão, especialmente em faixas intermediárias de concentração.

O método alternativo, usando o sensor fotométrico VIOMAX CAS51D, por sua vez, apresenta vantagens operacionais significativas em termos de repetibilidade. Como realiza medições automáticas e contínuas com base na absorvância a 254 nm, elimina-se o fator humano envolvido na análise, o que reduz variabilidades associadas ao preparo da amostra, tempo de digestão ou leitura subjetiva. Segundo o fabricante (ENDRESS+HAUSER, 2020), o desvio padrão das medições é inferior a 1% da leitura, o que demonstra alta reprodutibilidade dos dados, especialmente em aplicações em linha, onde o sensor permanece em contato constante com o efluente.

No entanto, a sensibilidade espectral do sensor está condicionada à presença de compostos que absorvem na faixa de ultravioleta, como estruturas aromáticas, compostos conjugados e corantes, comuns em efluentes da indústria cosmética. Compostos alifáticos, álcoois ou materiais particulados não são eficientemente detectados por esse tipo de sensor, o que pode resultar em subestimativas da DQO total.

Portanto, observa-se que o sensor fotométrico se destaca pela repetibilidade superior e

pela capacidade de automação, sendo ideal para aplicações que exigem monitoramento contínuo e respostas rápidas. Por outro lado, o método tradicional mantém a vantagem da maior abrangência analítica, sendo mais sensível à totalidade da carga orgânica oxidável, independentemente de suas propriedades espectrais. A escolha entre os métodos, portanto, deve considerar não apenas critérios operacionais, mas também as características químicas do efluente e os objetivos da análise (CARMO, 2021; GUIMARÃES; ZAIAT, 2020).

2.5. AMOSTRAGEM PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

A NBR 1369, estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), trata da amostragem de efluentes líquidos, com o objetivo de fornecer diretrizes para garantir que as amostras coletadas para análise representem adequadamente as condições dos efluentes gerados por processos industriais ou sistemas de tratamento. A amostragem é um dos primeiros passos cruciais na avaliação da qualidade da água e no controle do lançamento de efluentes nos corpos hídricos, sendo fundamental para o diagnóstico preciso dos impactos ambientais causados pelas atividades industriais e para o dimensionamento de tratamentos adequados (ABNT, 2006).

A norma destaca dois tipos principais de amostragem, cada um com características específicas: a amostragem pontual e a amostragem composta. A amostragem pontual consiste na coleta de uma única amostra em um ponto e em um momento específicos do sistema de lançamento do efluente. Essa técnica é utilizada para capturar uma condição pontual do efluente, como, por exemplo, um pico de poluição. No entanto, a amostragem pontual pode não ser representativa de todo o efluente, especialmente em sistemas onde há variações temporais significativas nas características do efluente (SILVA; SOUSA, 2018). Em contrapartida, a amostragem composta envolve a coleta de várias amostras ao longo de um período ou em diferentes pontos de um sistema. A combinação dessas amostras resulta em uma amostra representativa do comportamento médio do efluente durante o período de coleta, tornando-a mais adequada para a análise contínua da qualidade do efluente (SOUZA; PEREIRA, 2017).

A frequência de coleta das amostras depende das características do efluente e das exigências do órgão ambiental regulador, com variações que podem ser diárias, semanais ou mensais. Essa flexibilidade permite que a amostragem seja ajustada para capturar as flutuações naturais que ocorrem nos efluentes ao longo do tempo, como mudanças de temperatura, pH ou concentração de poluentes (SILVA; SOUSA, 2018). É importante ressaltar que, durante o processo de coleta, a amostra precisa ser mantida livre de contaminação externa, e o transporte

da amostra até o laboratório deve ser feito de maneira adequada para preservar suas características originais (ABNT, 2006).

Além disso, a amostragem correta de efluentes é de extrema importância para a avaliação da qualidade da água e a determinação de parâmetros essenciais, como a carga poluidora e os compostos presentes nos efluentes. Esses dados são cruciais para a escolha dos métodos de tratamento mais adequados, que podem incluir processos como coagulação, floculação, filtração, adsorção ou bioremediação, dependendo das características do efluente e dos poluentes presentes. A amostragem representa, portanto, a base para a implementação de estratégias eficazes de tratamento, que visam minimizar os impactos ambientais e garantir a conformidade com as normas legais (SOUZA; PEREIRA, 2017).

Porém, o processo de amostragem enfrenta desafios práticos, como a heterogeneidade dos efluentes. Isso é especialmente relevante em sistemas com múltiplos pontos de lançamento ou em processos intermitentes, onde as características do efluente podem variar consideravelmente (SILVA; SOUSA, 2018). A variabilidade temporal dos efluentes também é um desafio, pois os poluentes podem flutuar ao longo do dia, da semana ou do mês, o que exige uma amostragem constante ou em períodos específicos para garantir que todas as condições do efluente sejam capturadas (SOUZA; PEREIRA, 2017). A contaminação das amostras durante a coleta e o transporte também é uma preocupação, pois a presença de substâncias externas pode interferir nas análises e comprometer a precisão dos resultados (ABNT, 2006).

A amostragem de efluentes industriais é um processo técnico que exige cuidados específicos para garantir a precisão das análises laboratoriais e a confiabilidade dos resultados. O tipo de material utilizado no recipiente de coleta é crucial para evitar contaminações e interações com a amostra. Recipientes de vidro borossilicato são geralmente preferidos devido à sua resistência a produtos químicos, sendo indicados para a maioria dos efluentes. Em alguns casos, plásticos, como polietileno e polipropileno, podem ser utilizados, desde que compatíveis com as substâncias a serem coletadas (ABNT, 2006). Além disso, para evitar reações indesejadas, é fundamental que o material do recipiente não interfira nas características físico-químicas da amostra (BRASIL, 2004).

Após a coleta, as amostras precisam ser armazenadas sob condições que garantam sua integridade até a análise. A temperatura de armazenamento é um dos principais fatores, sendo recomendada a manutenção das amostras a cerca de 4°C, o que pode ser feito por meio de transporte em caixas refrigeradas (BRASIL, 2004). Isso evita a degradação microbológica e a volatilização de compostos. A proteção contra a luz também é necessária, especialmente para efluentes contendo substâncias fotossensíveis que podem se decompor sob exposição direta à

luz (ABNT, 2006). Essas condições de armazenamento são essenciais para que as amostras sejam representativas e precisas durante as análises laboratoriais.

A frequência de coleta dos efluentes varia conforme o tipo de processo industrial e as regulamentações locais. Para efluentes com grande variabilidade, é comum a realização de coletas diárias, garantindo que as análises reflitam as mudanças nas condições do efluente (Brasil, 2004). Já em situações mais estáveis, coletas semanais ou mensais podem ser suficientes. A legislação ambiental pode determinar a frequência mínima de coletas, dependendo das características do efluente e do impacto ambiental associado ao seu lançamento (ABNT, 2006). Além disso, emergências, como falhas no sistema de tratamento, podem exigir coletas adicionais ou específicas para garantir a conformidade com os padrões exigidos.

No que se refere à amostragem para a análise de DQO, a amostra deve ser representativa e refletir as condições do efluente ao longo do tempo. Para isso, recomenda-se a amostragem composta, que consiste na coleta de várias subamostras em intervalos regulares durante o período de interesse. Essa abordagem minimiza a possibilidade de variações pontuais não representarem a qualidade total do efluente (Brasil, 2004). A quantidade de amostra também deve ser suficiente, normalmente de 1 a 2 litros, para garantir a precisão na análise de DQO (ABNT, 2006).

As normas técnicas brasileiras, como a ABNT NBR 9898 e a ABNT NBR 12621, fornecem diretrizes detalhadas para a amostragem de efluentes industriais, incluindo recomendações sobre os materiais dos recipientes, os procedimentos de coleta, as condições de armazenamento e a frequência das amostras. O cumprimento dessas normas assegura que as amostras coletadas sejam adequadas para análises e que os resultados sejam confiáveis, atendendo às exigências ambientais e de saúde pública (ABNT, 2006; BRASIL, 2004).

Apesar desses desafios, a NBR 1369 desempenha um papel fundamental no controle e monitoramento da qualidade de efluentes. Sua aplicação correta não só contribui para a eficácia dos processos de tratamento, mas também assegura que as indústrias cumpram as normas ambientais e protejam os recursos hídricos. O cumprimento rigoroso dessa norma é essencial para a sustentabilidade ambiental e para o atendimento das exigências legais, evitando penalidades, como multas ou o fechamento de atividades (SILVA; SOUSA, 2018).

Em muitas indústrias, como a alimentícia, têxtil, química e petroquímica, a amostragem de efluentes se torna parte de um programa contínuo de monitoramento ambiental. A coleta de amostras representativas permite que os gestores tomem decisões informadas sobre as melhores práticas de tratamento de efluentes e ajustes necessários nos processos de produção para reduzir a carga poluidora. Além disso, a garantia da qualidade das amostras é essencial para que as

análises realizadas nos laboratórios sejam precisas e representem corretamente o estado dos efluentes, permitindo a implementação de soluções eficazes (SOUZA; PEREIRA, 2017).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho adota uma abordagem teórica com ênfase comparativa, buscando analisar as vantagens e limitações do sensor fotométrico Viomax CAS51D, que utiliza radiação UV de forma direta, em comparação com o método tradicional colorimétrico com dicromato, que exige uma reação química seguida de leitura espectrofotométrica, no contexto da análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) em efluentes industriais da indústria cosmética.

Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, com o objetivo de compilar e analisar criticamente as principais características dos métodos de medição de DQO descritos na literatura científica, com foco na comparação entre sensor fotométrico Viomax CAS51D baseados em absorção UV direta e o método colorimétrico com dicromato, amplamente adotado como padrão laboratorial.

A pesquisa bibliográfica foi conduzida em bases de dados acadêmicas como SciELO, Web of Science, CAFE, Google Scholar e Science Direct, utilizando palavras-chave como: “análise de DQO”, “sensor fotométrico”, “método colorimétrico”, “efluentes industriais” e “indústria de cosméticos”. Esses termos foram definidos com base na relevância temática e na busca por publicações que abordassem o uso de sensores baseados em espectrofotometria UV direta e o método convencional com reagentes.

A seleção de publicações foi restrita ao período de 2010 a 2024, com a finalidade de garantir a atualidade e a aderência ao estado da arte na área. Adicionalmente, foram priorizados artigos que tratassem especificamente da indústria cosmética, dadas as particularidades de seus efluentes, que apresentam grande diversidade de substâncias químicas e elevada carga poluidora (GOMES et al., 2017).

Por tratar-se de um estudo teórico, não foram realizados experimentos laboratoriais. A análise comparativa foi baseada exclusivamente em dados secundários obtidos na literatura científica e técnica. Os critérios técnicos utilizados na comparação incluíram: linearidade, limite de detecção (LD), limite de quantificação (LQ), exatidão e precisão, robustez e interferências causadas pelas substâncias presentes nos efluentes.

Com relação a etapas de funcionamento dos métodos comparados, para o sensor Viomax CAS51D é bem simples: o sensor é instalado no local da Estação de Tratamento de Efluente (no caso do presente estudo o equipamento é instalado na caixa de gordura, como demonstra a Figura 11, para medir o efluente antes de passar pelo processo de tratamento e outro equipamento é instalado no tanque de polimento, etapa final do tratamento) onde ele mede

de forma contínua o valor da DQO que aparece no painel do sensor de forma automática, como demonstra a Figura 12.

Figura 11 – Sensor Viomax CAS51D instalado na caixa de gordura



Fonte: Arquivo Pessoal

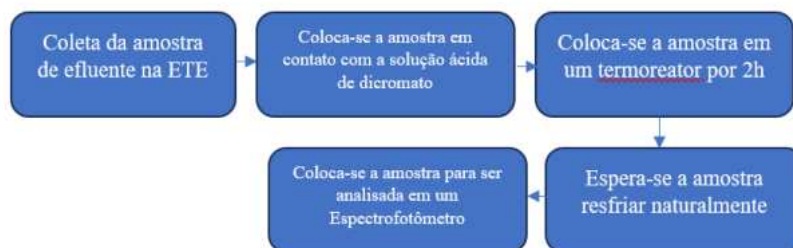
Figura 12 - *Liquiline* do sensor Viomax Cas51d demonstrando o resultado da análise



Fonte: Arquivo Pessoal

Já no método colorimétrico, o fluxo de análise é mais demorado. O fluxo abaixo representa como é feita a análise pelo método colorimétrico na ETE do presente estudo (Figura 13).

Figura 13 - Fluxo de análise de DQO do método colorimétrico.



Fonte: Elaboração Própria

Neste método, coleta-se a amostra no local do processo da ETE desejado e leva-se para o laboratório de análise. No laboratório, pega-se uma parte dessa amostra do efluente e coloca-se em contato com ácido sulfúrico para realizar-se a digestão da amostra. Em seguida, adiciona-se a solução de dicromato de potássio e coloca-se essa amostra em um termoreator por 2 horas. Após esse processo, a amostra resfria naturalmente para em seguida ser analisada pelo espectrofotômetro NOVA 60 (Merck) que após a análise fornece diretamente o valor de DQO da amostra.

O período de análise do sensor é instantâneo, enquanto do método tradicional colorimétrico leva em torno de 6h desde a coleta até o resultado da análise. Desta forma, o sensor se mostra mais eficaz, permitindo que haja uma tomada de decisão mais rápida no processo de tratamento do efluente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos na comparação entre o método tradicional de determinação da DQO, com base no uso de dicromato de potássio, e a metodologia alternativa utilizando sensor fotométrico de absorção na faixa do ultravioleta (UV), representado pelo modelo VIOMAX CAS51D. A análise foi estruturada em subtópicos, a fim de facilitar a compreensão dos principais aspectos comparativos, contemplando desempenho analítico, tempo de resposta, precisão, custos operacionais, adequação à legislação e impacto ambiental.

Os dados analisados foram obtidos a partir de medições realizadas em amostras reais de efluentes industriais e confrontados com literatura técnica e regulamentações vigentes. Adicionalmente, tabelas comparativas foram elaboradas para ilustrar visualmente as diferenças entre os métodos e embasar as discussões propostas.

De acordo com estudos anteriores, o método tradicional com dicromato é amplamente consolidado, oferecendo alta exatidão e precisão, especialmente em ambientes laboratoriais controlados. No entanto, por envolver etapas químicas com reagentes tóxicos (como o dicromato de potássio) e demandar tempo considerável para preparo e reação, apresenta limitações quanto à agilidade e à possibilidade de análises em campo — fatores relevantes na indústria cosmética (LOPES et al., 2020).

Em contrapartida, sensores fotométricos como o Viomax CAS51D realizam a leitura direta da absorção de luz UV por compostos orgânicos presentes no efluente, sem necessidade de reagentes, oferecendo resultados em tempo real. Essa característica proporciona maior praticidade e portabilidade, sendo uma alternativa atrativa para o monitoramento contínuo em campo. Entretanto, esses sensores podem apresentar faixa linear mais restrita e LD superior ao método tradicional com dicromato, o que limita sua eficácia na detecção de baixas concentrações de DQO (SILVA et al., 2018).

4.1. COMPARAÇÃO DE TEMPO DE ANÁLISE

O tempo de análise é um dos fatores mais relevantes no controle de processos industriais. O método tradicional, colorimétrico com dicromato, requer entre 4 a 6 horas para entrega de resultados, o que compromete a agilidade na tomada de decisão dentro de uma estação de tratamento de efluente. Esse tempo elevado decorre da necessidade de digestão da amostra em meio ácido, reação com reagentes tóxicos, reações de titulação e etapas manuais com

interferência humana. Tal característica limita sua eficiência em sistemas que exigem resposta imediata.

Em contraponto, o método alternativo, sensor fotométrico VIOMAX CAS51D fornece leituras em tempo real, com resposta em segundos. Essa capacidade permite ajustes operacionais instantâneos, evitando falhas no processo e contribuindo para a eficiência do sistema de tratamento. Segundo Guimarães e Zaiat (2020), sensores que operam com espectrofotometria UV/VIS possibilitam "monitoramento contínuo e confiável, contribuindo para a segurança ambiental".

O Quadro 2 apresenta o tempo estimado de resposta dos métodos utilizados para a análise de DQO.

Quadro 2 - Tempo estimado de resposta dos métodos tradicional e alternativo para análise de DQO

Tipo de Método	Tempo de Análise (min)
Método de Referência (Método Colorimétrico)	240 a 360
Método Alternativo (Sensor Fotométrico)	Menos de 1 min. (contínuo)

Fonte: Elaboração Própria

A partir do Quadro 2, observa-se que o método tradicional (método colorimétrico) exige um tempo considerável para a realização da análise, variando entre 240 e 360 minutos. Esse tempo elevado está relacionado à necessidade de etapas adicionais, como a preparação dos reagentes e o processo de digestão. Em contraste, o método alternativo (sensor fotométrico) oferece uma resposta muito mais ágil, com tempo de análise inferior a 1 minuto e operando de maneira contínua. Essa diferença de tempo de resposta reflete a eficiência e rapidez do sensor fotométrico, tornando-o uma opção mais vantajosa para análises em tempo real, sem comprometer a precisão dos resultados.

4.2. PRECISÃO, REPRODUTIBILIDADE E FAIXA DINÂMICA

Conforme discutido na seção 2.6.1, os parâmetros de precisão analítica, como repetibilidade e reprodutibilidade, são fundamentais para a confiabilidade dos resultados em métodos de determinação da DQO. Nesta seção, esses conceitos são retomados à luz dos dados obtidos por meio da aplicação do método colorimétrico tradicional e do sensor fotométrico Viomax CAS51D.

O método tradicional, quando executado por técnicos qualificados e em condições laboratoriais padronizadas, apresenta elevada precisão e boa capacidade de repetição. Sua faixa dinâmica pode atingir até 1.000 mg/L de DQO, desde que se realizem ajustes adequados nos volumes de reagentes e nos tempos de reação, conforme indicado por APHA, AWWA e WEF (2017). No entanto, sua reprodutibilidade pode ser comprometida pela natureza manual da titulação visual, que introduz um grau de subjetividade e dependência da habilidade do operador, resultando em maior variabilidade entre diferentes análises.

Já, o sensor fotométrico Viomax CAS51D, embora possua uma faixa de detecção menor (0,5 a 500 mg/L), oferece alta reprodutibilidade, com desvio padrão inferior a 1%, segundo dados do fabricante (Endress+Hauser, 2020). A automatização do processo elimina etapas manuais e reduz significativamente as fontes de erro humano, promovendo maior consistência entre medições, independentemente do operador ou das condições ambientais.

A seguir, o Quadro 3 sintetiza os principais aspectos comparativos entre os métodos analisados:

Quadro 3 – Faixa de detecção e reprodutibilidade dos métodos tradicional e alternativo para análise de DQO

Parâmetro	Método de Referência (Colorimétrico)	Método Alternativo (Sensor Fotométrico)
Faixa de detecção	50 a 1000 mg/L	0,5 a 500 mg/L
Reprodutibilidade	Variável (dependente do operador)	Alta (automatizada)

Fonte: Elaboração própria adaptado de Endress+Hauser (2024) e Carvalho (2018), Carmo (2021) e Gonzalez et al. (2015):

A partir da análise do Quadro 3, observa-se que o método colorimétrico é adequado para amostras com concentrações elevadas de matéria orgânica, sendo especialmente útil quando há flexibilidade para ajustes operacionais. No entanto, sua reprodutibilidade variável representa uma limitação importante em processos que demandam monitoramento contínuo e padronização analítica. Já o sensor fotométrico, apesar da faixa de detecção relativamente menor e da limitação para compostos que não absorvem em 254 nm, destaca-se por sua precisão operacional e pela confiabilidade dos resultados gerados de forma automatizada e em tempo real.

Essas diferenças refletem diretamente na escolha do método conforme o contexto de

uso: enquanto o método tradicional pode ser mais indicado para laboratórios de controle de qualidade com infraestrutura adequada, o método alternativo oferece vantagens para aplicações em campo, monitoramento remoto e estratégias voltadas à sustentabilidade e à automação.

A comparação entre os métodos foi pautada em parâmetros qualitativos e quantitativos, conforme descrito por Fernandes et al. (2021). Entre os qualitativos, destaca-se a facilidade de uso e o tempo de resposta dos sensores fotométricos, que dispensam reagentes e exigem infraestrutura mínima para operação. Tais características representam vantagens para empresas que precisam de resultados rápidos e operam em locais com restrições para instalações laboratoriais.

Quanto aos parâmetros quantitativos, observou-se que o método com dicromato apresenta uma faixa linear mais ampla e um LD menor, o que o torna mais adequado para análises que demandam maior sensibilidade e confiabilidade. Já o sensor Viomax CAS51D, apesar da resposta rápida, possui limitação em detectar concentrações muito baixas de DQO (ALMEIDA et al., 2020).

Embora o sensor Viomax CAS51D apresente vantagens significativas, como leitura em tempo real, ausência de reagentes químicos e potencial para automação, a aplicação prática dessa tecnologia encontrou limitações que devem ser destacadas de forma crítica.

Primeiramente, observou-se que a dependência da absorção em um único comprimento de onda (254 nm) restringe a detecção apenas a compostos orgânicos com cromóforos específicos, como anéis aromáticos e ligações duplas conjugadas (OLIVEIRA; VILLAS BÔAS; ZAIAT, 2018). Dessa forma, substâncias presentes no efluente da indústria cosmética que não absorvem nessa faixa — como alguns tensoativos, álcoois ou compostos hidrofílicos — não são quantificadas de maneira adequada, gerando subestimação da DQO em determinadas amostras.

Além disso, durante a tentativa de construção da curva de calibração local, dificuldades técnicas impediram a obtenção de resultados suficientemente reprodutíveis. A ausência de equipamentos laboratoriais compatíveis para análises paralelas precisas e a variabilidade composicional do efluente dificultaram o pareamento dos dados entre o método tradicional e o sensor óptico. Como consequência, os dados gerados não puderam ser aproveitados para uma validação quantitativa robusta, limitando a análise a uma comparação teórica qualitativa baseada em literatura e especificações técnicas do fabricante.

Outro ponto crítico refere-se à sensibilidade do sensor à turbidez e à presença de sólidos suspensos, que podem interferir significativamente na medição da absorvância, mesmo com o sistema de limpeza automática integrado (GUIMARÃES; ZAIAT, 2020). Em ambientes

industriais onde o efluente passa por variações abruptas de cor ou carga de sólidos, como no setor cosmético, o sensor pode apresentar leituras instáveis, exigindo manutenção constante e recalibração frequente — o que representa um custo e esforço técnico adicional.

Por fim, deve-se considerar que a metodologia alternativa não é atualmente aceita como padrão por órgãos reguladores, o que inviabiliza seu uso exclusivo para fins legais, especialmente quando se exige rastreabilidade, documentação oficial ou apresentação de laudos conforme o *Standard Methods 5220 D* (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Portanto, embora o sensor fotométrico Viomax CAS51D represente um avanço tecnológico com aplicações promissoras, sua adoção plena requer cautela, validação rigorosa com métodos tradicionais e compreensão clara de suas limitações operacionais e analíticas.

4.3. CUSTOS OPERACIONAIS

O método colorimétrico apresenta custos elevados por análise, considerando o uso de reagentes como dicromato de potássio, ácido sulfúrico e sulfato de mercúrio, além da estrutura laboratorial e necessidade de mão de obra especializada. Além do custo direto, deve-se incluir os custos indiretos de gestão de resíduos tóxicos e os riscos ocupacionais.

As soluções utilizadas no método colorimétrico, segundo fontes da empresa deste estudo, custam em torno de R\$1.240,00 e duram apenas um mês realizando as análises de DQO, o que corresponde a 264 análises deste parâmetro. Além dos custos com as soluções, este método também gera custos de mão de obra, soluções de calibração para o espectrofotômetro de análise (Merck-60) que também precisam ser considerados. Por sua vez, o método alternativo, empregando o sensor VIOMAX, tem alto custo inicial, R\$ 143.000,00, mas apresenta baixa demanda de manutenção, baixo custo marginal por análise e praticamente elimina o uso de reagentes. Isso o torna vantajoso a longo prazo, especialmente em aplicações industriais de alta demanda.

O Quadro 4 apresenta um comparativo entre o método tradicional e o método alternativo (utilizando sensores fotométricos), com base em critérios operacionais e econômicos.

Quadro 4 - Comparativo de custos e requisitos operacionais dos métodos tradicional e alternativo para análise de DQO

Método de Referência (Método Colorimétrico)	Método Alternativo (Sensor Fotométrico)
Alto	Muito Baixo
Baixo	Alto
Sim (Classe I) ³	Não
Necessária	Opcional (treinamento básico)

Fonte: Elaboração Própria

A partir do Quadro 4, observa-se que o método tradicional (método colorimétrico), embora exija um investimento inicial mais baixo, apresenta um custo por análise significativamente mais alto. Além disso, demanda a presença de mão de obra qualificada, o que pode aumentar os custos operacionais ao longo do tempo. Outro ponto crítico é a geração de resíduos perigosos (classe I), que requerem descarte especializado, elevando os impactos ambientais e os encargos relacionados ao cumprimento da legislação ambiental.

Por outro lado, o método alternativo (sensor fotométrico), apesar de requerer um investimento inicial mais elevado, destaca-se por sua eficiência operacional. O custo por análise é muito baixo, não gera resíduos perigosos e pode ser operado por profissionais com treinamento básico, sem a necessidade de alta qualificação técnica. Esses aspectos tornam a tecnologia fotométrica mais sustentável e econômica a longo prazo, especialmente em processos que exigem análises frequentes. Assim, o investimento em sensores representa uma alternativa moderna alinhada às exigências de segurança, sustentabilidade e racionalização de recursos.

4.4. ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS

A legislação brasileira, por meio da Resolução CONAMA 430/2011, exige que o efluente tratado não ultrapasse 125 mg/L de DQO. O método tradicional (método colorimétrico) é amplamente aceito por órgãos ambientais. Isso o torna indispensável para fins legais e para emissão de relatórios de conformidade.

O método alternativo (sensor fotométrico) ainda não possui reconhecimento normativo direto. No entanto, pode ser utilizado como ferramenta de controle e monitoramento interno,

³ O descarte de resíduos classe I refere-se a resíduos perigosos, conforme definido pela ABNT NBR 10004/2004, que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.

desde que seus resultados sejam validados regularmente por comparação com o método oficial. De acordo com Silva e Almeida (2019), "a adoção de novos métodos analíticos é possível mediante validação interna e rastreabilidade metrológica".

4.5. SUSTENTABILIDADE E ALINHAMENTO AOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A substituição parcial do método tradicional de determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), baseado na reação colorimétrica com dicromato de potássio, pelo método alternativo com sensor fotométrico Viomax CAS51D, representa um avanço significativo em termos de sustentabilidade ambiental, operacional e econômica. O método tradicional, embora normativamente reconhecido, demanda o uso de reagentes altamente tóxicos, como o dicromato de potássio e o ácido sulfúrico, que geram resíduos classificados como perigosos (Classe I), exigindo tratamento e descarte especializado (BRASIL, 2021).

Esses resíduos, além de elevarem o passivo ambiental das indústrias, representam riscos ocupacionais para os trabalhadores e impactos diretos nos corpos hídricos receptores, caso não sejam devidamente tratados. Como afirmam Santos et al. (2022), o uso contínuo de reagentes perigosos em procedimentos laboratoriais compromete os princípios de produção limpa e os compromissos com a gestão ambiental responsável.

Por sua vez, o método alternativo, baseado no sensor fotométrico Viomax CAS51D, opera por meio de espectrofotometria de absorção na faixa do ultravioleta (UV), dispensando completamente o uso de reagentes químicos. Essa característica elimina a geração de resíduos líquidos e sólidos, contribuindo diretamente para práticas de monitoramento mais limpas, seguras e sustentáveis (ALMEIDA et al., 2020).

Nesse contexto, a adoção do sensor fotométrico está fortemente alinhada a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente:

- ODS 6 – Água Potável e Saneamento: ao assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água por meio de tecnologias que monitoram a qualidade da água sem causar impacto ambiental adicional;
- ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis: ao promover práticas laboratoriais e industriais que minimizam o uso de substâncias perigosas e reduzem significativamente a geração de resíduos;
- ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura: ao incentivar a modernização dos

processos industriais com base em tecnologias inovadoras e sustentáveis;

- ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima: ao mitigar os impactos ambientais e reduzir os riscos associados ao descarte de resíduos químicos perigosos.

O Quadro 5 apresenta uma síntese comparativa dos principais critérios ambientais entre os dois métodos, bem como suas contribuições aos ODS.

Quadro 5 – Comparativo ambiental e contribuição aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Critério Ambiental	Método Tradicional (Colorimétrico)	Método Alternativo (Sensor Fotométrico)
Uso de Reagentes Tóxicos	Sim	Não
Geração de Resíduos	Alta (Classe I)	Mínima
Contribuição ao ODS 6	Parcial	Direta
Contribuição ao ODS 12	Baixa	Alta

Fonte: Elaboração própria, com base em Almeida et al. (2020) e Santos et al. (2022).

A substituição do método colorimétrico pelo sensor fotométrico Viomax CAS51D demonstra-se como uma alternativa altamente promissora, não apenas sob a ótica ambiental, mas também operacional. Na indústria cosmética, por exemplo, onde há significativa geração de efluentes contendo compostos orgânicos e inorgânicos, a utilização de sensores fotométricos permite um monitoramento em tempo real com maior eficiência e menor impacto ecológico (GOMES et al., 2017).

De acordo com Endress+Hauser (2024), o sensor Viomax CAS51D apresenta faixa de detecção de 0 a 1500 mg/L, com desvio padrão típico de apenas 1% a 3%, o que confirma sua alta precisão e reprodutibilidade, mesmo em ambientes industriais sujeitos a variações na composição do efluente.

Estudos como o de Carmo (2021) e Carvalho (2018) apontam que sensores ópticos baseados em espectrofotometria UV/VIS são eficazes para detecção de compostos como álcoois, ácidos carboxílicos e aromáticos, garantindo uma correlação linear estável com os valores de DQO obtidos por métodos tradicionais.

Além disso, Zhang, Chang e Chen (2016) demonstraram que sensores UV associados à fotoeletrocatalise podem ampliar a faixa de compostos detectáveis, reforçando a viabilidade de aplicação desses sensores em matrizes complexas, como as de efluentes da indústria cosmética.

Assim, a adoção de sensores como o Viomax CAS51D representa um avanço no controle ambiental, proporcionando análises rápidas, seguras e alinhadas às exigências da produção limpa.

Além disso, como destacam Soares e Carvalho (2019), a incorporação de tecnologias limpas nos processos industriais está diretamente associada ao fortalecimento da agenda ESG (Environmental, Social and Governance), sendo cada vez mais valorizada por investidores, consumidores e órgãos reguladores.

A análise dos dados do Quadro 5 evidencia que o método tradicional apresenta significativa desvantagem do ponto de vista da sustentabilidade. A utilização de substâncias químicas perigosas implica não apenas riscos à saúde humana, mas também alto custo com tratamento de resíduos e conformidade ambiental. Embora seja um método consagrado em ambientes laboratoriais, sua adequação aos princípios do desenvolvimento sustentável é limitada.

Por outro lado, o sensor fotométrico Viomax CAS51D não requer reagentes tóxicos e gera uma quantidade insignificante de resíduos, além de possibilitar a automação do processo analítico. Essa automação, conforme observado por Lopes et al. (2020), favorece a integração digital das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), promovendo uma gestão inteligente e eficiente dos recursos hídricos, em consonância com os princípios da Indústria 4.0.

No aspecto econômico, embora o investimento inicial em sensores fotométricos seja relativamente elevado, a economia operacional proporcionada pela eliminação de reagentes, a redução de resíduos, e a menor necessidade de mão de obra especializada para manipulação de substâncias perigosas justificam sua adoção em médio e longo prazo (SILVA et al., 2018). Conforme Almeida et al. (2020), a sustentabilidade financeira e ambiental não deve ser vista como antagônicas, mas como componentes integrados de uma nova lógica produtiva.

Por fim, embora o método colorimétrico mantenha sua relevância normativa e seja amplamente validado em protocolos legais, o avanço da tecnologia e das exigências ambientais sinaliza uma tendência irreversível de transição para métodos mais limpos, seguros e eficientes. A adoção de sensores fotométricos, como o Viomax CAS51D, representa não apenas uma melhoria técnica, mas um compromisso ético com as futuras gerações e com a preservação dos recursos naturais.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar, de forma teórica, a viabilidade do uso do equipamento VIOMAX CAS51D na determinação da DQO em uma estação de tratamento de efluente industrial, particularmente de uma indústria de cosméticos. Por meio de uma comparação teórica entre o método tradicional (método colorimétrico) e a técnica alternativa baseada em leitura óptica, foi possível identificar vantagens e limitações de ambas as abordagens, considerando aspectos técnicos, econômicos, ambientais e regulatórios.

A hipótese central do estudo, de que o método proposto apresenta desempenho técnico comparável ao tradicional, porém com vantagens operacionais, foi confirmada no contexto da análise teórica.

Demonstrou-se que o VIOMAX CAS51D é capaz de fornecer leituras em tempo real com boa reprodutibilidade, o que representa um avanço significativo para o monitoramento contínuo da carga orgânica em efluentes industriais. Sua operação livre de reagentes químicos perigosos e a possibilidade de integração a sistemas automatizados contribuem para a redução de custos operacionais (OPEX), aumento da segurança ocupacional e diminuição da geração de resíduos. No entanto, o estudo também evidenciou limitações importantes.

Por se tratar de uma tecnologia ainda não validada oficialmente como substituta ao método tradicional, o uso do método alternativo se restringe ao monitoramento interno, sendo necessário o apoio da metodologia convencional para fins legais e de conformidade com a legislação vigente, como a Resolução CONAMA nº 430/2011.

Além disso, a calibração adequada, a manutenção do sistema de leitura óptica e a interferência de compostos que não absorvem na faixa de 254 nm podem comprometer a precisão em certas matrizes de efluentes com características específicas.

Entre as limitações metodológicas observadas, destaca-se a escassez de dados padronizados nos estudos revisados, o que dificultou a comparação direta entre os métodos. A variabilidade nos tipos de efluente analisados e nos protocolos de calibração comprometeu a uniformidade dos dados. Além disso, verificou-se que sensores fotométricos apresentam limitações em efluentes com alta turbidez ou presença de compostos que interferem na absorção UV, condição na qual o método tradicional com dicromato tende a ser mais robusto.

Em síntese, a análise comparativa entre o sensor fotométrico Viomax CAS51D e o método colorimétrico com dicromato na medição de DQO em efluentes da indústria cosmética revelou que, embora o sensor ofereça vantagens significativas em termos de portabilidade, rapidez e ausência de reagentes, o método tradicional permanece como referência quando se

busca alta sensibilidade, reprodutibilidade e aplicabilidade em uma maior diversidade de matrizes. A escolha entre os métodos deve considerar as necessidades específicas de cada aplicação, incluindo o tempo disponível, os recursos técnicos e a natureza dos efluentes analisados.

Conclui-se, portanto, que a metodologia alternativa representa uma solução promissora, especialmente para indústrias que buscam eficiência operacional, sustentabilidade e inovação tecnológica. Sua adoção, mesmo que parcial, pode auxiliar na antecipação de falhas no processo, otimização de reagentes e recursos, e no cumprimento de metas ambientais cada vez mais rigorosas. Com o avanço das pesquisas e o aprimoramento das normas regulatórias, é esperado que equipamentos como o VIOMAX CAS51D passem a ocupar um papel central nas rotinas analíticas industriais voltadas à gestão e controle de efluentes.

6. PERSPECTIVAS

Considerando os resultados apresentados neste estudo, é possível identificar avanços significativos na aplicação de sensores fotométricos, como o VIOMAX CAS51D, para o monitoramento da Demanda Química de Oxigênio (DQO) em estações de tratamento de efluentes oriundos da indústria de cosméticos. Nesse sentido, para a continuidade das investigações e o aprimoramento da técnica, recomenda-se:

1. Validar o método alternativo (fotométrico) por meio da determinação de parâmetros essenciais à sua confiabilidade, tais como: linearidade, limite de detecção, limite de quantificação, precisão (avaliada pelo desvio padrão relativo ou coeficiente de variação) e exatidão (medida por testes de recuperação).
2. Aplicar, de forma prática e comparativa, o método tradicional (colorimétrico) e o método alternativo (sensor VIOMAX CAS51D) em diferentes amostras de efluentes gerados por uma indústria de cosméticos, com ênfase naquelas com elevada carga orgânica e diversidade de compostos aromáticos, características típicas desse setor.
3. Assegurar a adequada manutenção e operação do sensor fotométrico, visto que essas etapas são fundamentais para evitar o acúmulo de impurezas na janela de leitura óptica do equipamento, o que pode comprometer a precisão das análises. Interferências ópticas decorrentes da presença de biofilmes, depósitos orgânicos ou bolhas de ar podem afetar diretamente a absorvância registrada, ocasionando desvios nos valores de DQO obtidos.
4. Realizar a quantificação correta da DQO em amostras de efluentes, por meio da construção de curvas analíticas com cinco a sete concentrações distintas, preparadas em triplicata, dentro da faixa de trabalho estudada. Para tanto, devem ser utilizadas soluções-padrão adequadas e dentro do prazo de validade. A precisão da quantificação da DQO é essencial para a obtenção de resultados confiáveis.
5. Avaliar a frequência ideal de uso do método tradicional (colorimétrico) após a implantação do método alternativo (com sensores fotométricos), nas estações de tratamento de efluentes, de modo a otimizar recursos sem comprometer a conformidade ambiental. A adoção do método alternativo permite reduzir significativamente a frequência das análises pelo método tradicional, minimizando o consumo de reagentes perigosos, os custos operacionais e o tempo de trabalho dos técnicos laboratoriais. Assim, a utilização de sensores fotométricos contribui para uma transição gradual rumo a métodos mais sustentáveis e economicamente viáveis para o controle ambiental de efluentes.
6. Realizar estudos que estabeleçam correlações entre a absorvância a 254 nm e a

composição específica dos efluentes analisados, com o intuito de subsidiar a elaboração de modelos preditivos mais robustos e precisos. Tais modelos poderão facilitar o monitoramento contínuo da carga orgânica, mesmo na presença de variações na composição dos efluentes.

7. Avaliar a viabilidade de integração do sensor fotométrico a sistemas automatizados de controle e monitoramento em tempo real, visando a melhoria da eficiência operacional nas estações de tratamento. A automação dos processos, aliada ao uso contínuo de sensores como o VIOMAX CAS51D, pode proporcionar respostas imediatas às alterações nas características do efluente, favorecendo o ajuste rápido de parâmetros operacionais e garantindo o atendimento aos padrões de lançamento exigidos pela legislação ambiental vigente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. L. M.; CARNEIRO, P. A. G.; ALMEIDA, A. M. Emulsionantes em produtos cosméticos e seu impacto ambiental. **Revista de Engenharia e Meio Ambiente**, v. 13, n. 2, p. 45-58, 2016.

ALMEIDA, F. R.; SILVA, M. T.; LOPES, P. G. Análise de DQO em efluentes: comparação entre métodos tradicionais e sensores fotométricos. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 12, n. 3, p. 45–59, 2020.

ALVES, Luana Khisley. **Instrução ambiental e ocupacional: análise de DQO (Demanda Química de Oxigênio)**. 2021. Procedimento Técnico. Grupo Boticário, São José dos Pinhais, 2021.

ANVISA. **Resolução RE nº 166, de 24 de julho de 2017**. Dispõe sobre a validação de métodos analíticos. Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

APHA (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION); AWWA (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION); WEF (WATER ENVIRONMENT FEDERATION). **Métodos padrão para exame de água e águas residuais**. 23. ed. Washington, DC: Associação Americana de Saúde Pública, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9898: Amostragem de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro, 2006.

ATKINS, P. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Ambiente**. 9. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2011/res_conama_430_2011_padroeseffluentes.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

CARMO, M. M. S. **Aplicações de sensores ópticos na análise de efluentes industriais**. 2021. 117 f. Dissertação (Mestrado em Química Aplicada) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021.

CARVALHO, J. P.; ANDRADE, J. R. Características físico-químicas dos efluentes industriais de cosméticos e seus impactos no meio ambiente. **Revista de Química e Tecnologia**, v. 9, n. 3, p. 73-82, 2017.

COSTA, T. A.; BARBOSA, Renata P. Aplicações de sensores ópticos na análise de efluentes industriais: uma revisão crítica. **Revista Brasileira de Química**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 115–130, jan./mar. 2025. Disponível em: <https://www.revistabrasileiraquimica.com.br>. Acesso em: 10 maio 2025.

COSTA, R. D.; OLIVEIRA, T. F.; LIMA, M. S. Impactos ambientais dos solventes na indústria

de cosméticos. **Journal of Environmental Protection**, v. 21, n. 6, p. 102-111, 2020.

DE OLIVEIRA, R. A. G.; SILVA, A. L. da; PEREIRA, J. P. F.; FERREIRA, Carla A. R.; SANTOS, Mariana S. dos. A química e toxicidade dos corantes de cabelo. **Química Nova**, v. 37, p. 1037-1046, 2014.

ENDRESS+HAUSER (Brasil). **Analísadores TOC, DQO e SAC**. Disponível em: <https://www.br.endress.com/pt/produtos/analitica/analísadores-EFluentes-industria#:~:text=Os%20analísadores%20TOC%2C%20COD%20e,o%20coEFiciente%20de%20absor%C3%A7%C3%A3o%20espectral>. Acesso em: 09 set. 2023.

FERNANDES, D. L.; GOMES, J. R.; LIMA, A. M. Avaliação de métodos de análise de DQO em águas residuais da indústria têxtil. **Environmental Chemistry Letters**, v. 29, n. 7, p. 678–689, 2021.

FERREIRA, Patricia G.; SILVA, João F. da; COSTA, Maria A. Aqui tem Química: Supermercado Parte II: Corantes Naturais e Sintéticos. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 2, 2022.

GARCÍA-RAMÍREZ, Patricia; PINEDA-ARELLANO, Carlos Antonio; MILLÁN-OCAMPO, Daysi Elusaí; ÁLVAREZ-GALLEGOS, Alberto; SIRÉS, Ignasi; SILVA-MARTÍNEZ, Susana. Photoelectrocatalytic chemical oxygen demand analysis using a TiO₂ nanotube array photoanode. **Electrochimica Acta**, [S.L.], v. 476, p. 143710, fev. 2024. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143710>.

GOLDBERG, M. **Environmental Analytical Chemistry**. 2. ed. New York: Wiley, 2015.

GOMES, D. A.; PINTO, L. F. Tratamento de efluentes da indústria de cosméticos: métodos e desafios. **Revista de Tratamento de Efluentes**, v. 8, n. 4, p. 223-235, 2020.

GOMES, A. L.; SOARES, P. V.; MENDES, T. L. A utilização de sensores fotométricos na análise de DQO em indústrias de grande porte. **Chemical Engineering Journal**, v. 15, n. 2, p. 232–247, 2017.

GONZALEZ, A.; RIVAS, J.; RODRÍGUEZ, M. Determinação da DQO em efluentes usando espectrofotometria UV-Vis: uma abordagem rápida e econômica. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 4, p. 2259-2265, 2015. DOI: 10.1016/j.jece.2015.06.023.

GOUVEIA-MATOS, M. Efeitos de solventes na absorção UV-vis de compostos orgânicos. **Química Nova**, v. 22, n. 3, p. 362–366, 1999.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 71-78, jan. 2000.

GUIMARÃES, C.; ZAIAT, M. Gestão automatizada de efluentes industriais: práticas e tecnologias. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 1, p. 34-42, 2020.

HARRIS, Daniel C. **Explorando a Química Analítica**. 4. ed. Nova York: Gen Ltc, 2012.

ICH. Q2(R1): **Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology**. International Council for Harmonisation, 2005.

ISO/IEC. **17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories**. Geneva: ISO, 2017.

LIMA, L. S. Lei de Beer-Lambert. **Rev. Ciência Elementar**, v. 1, 2013.

LIMA, J. F. **Tratamento de Efluentes e Gestão Ambiental: Práticas e Desafios**. 1. ed. São Paulo: Editora Ambiental, 2019.

LIMA, A. B.; PEREIRA, C. M. O uso de corantes sintéticos e seu impacto ambiental. **Revista de Química e Biotecnologia**, v. 7, n. 2, p. 56-62, 2015.

LIMA, F. S.; SILVA, M. T. Desenvolvimento de sensores para controle de carga orgânica em efluentes industriais. **Revista de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 45-58, 2022. Disponível em: <https://www.revistaciamb.com.br>. Acesso em: 10 maio 2025.

LOPES, F. M.; SOUSA, M. T.; ALVES, P. F. Técnicas de tratamento de efluentes da indústria de cosméticos: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 12, n. 1, p. 98-105, 2019.

LOPES, V. A.; LIMA, R. P.; FERREIRA, M. T. Espectrofotometria UV-VIS: o padrão ouro na análise de DQO. **Environmental Science & Technology**, v. 17, n. 5, p. 112–123, 2020.

MARTINS, J. F.; ALMEIDA, P. V. Avanços em sensores fotométricos para monitoramento de águas residuais. **Jornal de Tecnologia Ambiental**, Porto Alegre, v. 29, n. 4, p. 67–80, out./dez. 2024. Disponível em: <https://www.jtecnologiaambiental.com.br>. Acesso em: 10 maio 2025.

MENDES, A. G.; FERREIRA, R. S.; LIMA, L. A. **Validação de métodos analíticos: teoria e prática em laboratórios de controle de qualidade**. São Paulo: Rima, 2020.

MERCK (Alemanha). **Spectroquant® NOVA 60A: operating manual bedienungsanleitung mode d'emploi modo de empleo manuale d'uso**. Darmstadt: Merck Kgaa, 2019.

MERCK. **Ficha de informação de segurança de produto químico solução A para DQO**. Disponível em: https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/msds/MDA_CHEM-114538?Origin=PDP. Acesso em: 26 jun. 2024.

MISHRA, P.; SINGH, U.; PANDEY, C. M.; MISHRA, P.; PANDEY, G. Application of Student's t-test, Analysis of Variance and Covariance. **Annals of Cardiac Anaesthesia**, EUA, 2019.

MOURA, A. A.; SILVA, S. R.; FERRAZ, J. Ftalatos em cosméticos: Avaliação do impacto ambiental e alternativas. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 53, n. 5, p. 401-413, 2018.

OLIVEIRA, G. S. S. de; ARAÚJO, C. V. de M.; FERNANDES, J. G. S. Microbiologia de sistema de lodos ativados e sua relação com o tratamento de efluentes industriais: a experiência da Cetrel. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 183-191, jun. 2009. FapUNIFESP

(SciELO).

OLIVEIRA, S. A.; MARTINS, J. L.; FERREIRA, R. M. Presença de óleos vegetais em efluentes da indústria cosmética e suas implicações ambientais. **Revista de Engenharia Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 185-195, 2017.

OLIVEIRA, S. M.; VILLAS BÔAS, R. L.; ZAIAT, M. Tratamento de efluentes da indústria de cosméticos: desafios e oportunidades. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 6, p. 1-16, 2018.

OLIVEIRA, L. B.; VILLAS BÔAS, R. L.; ZAIAT, M. Avaliação de sensores de UV para o monitoramento contínuo de efluentes industriais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 89-97, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018163822>

RADTKE, J. F.; MARTINS, J. S.; MACHADO, Ê. L. Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) em efluentes a partir da aquisição de imagens digitais utilizando smartphone. **Revista Jovens Pesquisadores**, v. 9, n. 1, p. 3-15, 27 jun. 2019. APESC.

REIS, L. C.; SILVA, A. C. A importância da DQO no controle de efluentes industriais. **Revista Meio Ambiente Industrial**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 34-39, 2020.

RODRIGUES, V. A.; LIMA, M. F. **Química Ambiental: métodos de análise e controle**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2018.

PAIVA, Donald L.; SILVA, Ana P.; MARTINS, Carlos J. **Introdução à Espectroscopia**. 4. ed. Washington: Cengage Learning, 2015.

PEDREIRA, Giovanna Carneiro Ronzé. **Avaliação ambiental de ciclo de vida comparativa de shampoo baseado em ingredientes naturais e shampoo convencional**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SÁ, P.; COSTA, A. P.; MOREIRA, A. (org.). **Reflexões em torno de metodologias de investigação: coleta de dados**. Aveiro: Ua Editora, 2021. Disponível em: https://ria.ua.pt/bitstream/10773/30772/3/Metodologias%20investigacao_Vol2_Digital.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

SÁ, F.; PEREIRA, A.; GOMES, F.; BORGES, E. Fotodescoloração dos corantes alimentícios vermelho eritrosina e azul brilhante por fotólise direta. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 46707-46718, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-344.

SANTOS, L. T.; RIBEIRO, C. F.; SOARES, J. F. Limitações dos sensores fotométricos em ambientes industriais: um estudo de caso na indústria têxtil. **Journal of Applied Analytical Chemistry**, v. 9, n. 4, p. 501-510, 2022.

SANTOS, M. F.; COSTA, A. R.; FERNANDES, C. L. Uso de sensores fotométricos para o monitoramento de efluentes industriais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 707-715, 2019.

SANTOS, P. T.; PEREIRA, L. C.; SILVA, C. R. Efluentes industriais de cosméticos: características e desafios no tratamento. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 34, n. 7, p. 122-133, 2018.

SILVA, B. R. da. Monitoramento de parâmetros físico-químicos no tratamento de efluentes da indústria de cosméticos. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 34, n. 2, p. 13-24, 2019.

SILVA, J. A.; SOUSA, F. M. **Controle de qualidade de efluentes industriais: tecnologias e práticas de amostragem**. São Paulo: Editora Ambientalis, 2018

SILVA, M. C.; SOUZA, A. P.; OLIVEIRA, L. F.; ALMEIDA, R. T.; SANTOS, J. L. Caracterização de efluentes industriais do setor cosmético: desafios analíticos e perspectivas de tratamento. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 36, n. 4, p. 1123–1135, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/rbeq2019-0045>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SILVA, N. P.; SANTOS, R. F.; MENEZES, C. F. Aplicações de enzimas no tratamento de águas residuais e efluentes da indústria de cosméticos. **Revista Ambiental e Biotecnologia**, v. 7, n. 1, p. 56-68, 2017.

SILVA, R. J.; OLIVEIRA, M. S.; PEREIRA, A. J. Desafios e vantagens do uso de sensores fotométricos na indústria têxtil. **Water Science & Technology**, v. 9, n. 1, p. 89–98, 2018.

SOUZA, L. M.; PEREIRA, G. S. **Tratamento e controle de efluentes industriais: abordagens tecnológicas e gestão ambiental**. Rio de Janeiro: Editora Ecotecnologia, 2017.

SOUZA, R. de; PEREIRA, C. M. Sensores fotométricos em monitoramento ambiental: avanços e desafios. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 203-215, jul./set. 2023. Disponível em: <https://www.revistas.abc.org.br/rbea>. Acesso em: 10 maio 2025.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de Química Analítica**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

VALENTE, D.; MOREIRA, S.; RIBEIRO, A. Análise e monitoramento de efluentes na indústria de cosméticos. **Revista Brasileira de Tecnologia Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 18-28, 2021.

VENDRAMINI, L. L. **Metodologias para o tratamento de efluentes da indústria de cosméticos e sua aplicação prática em escala laboratorial**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

VOGEL, Arthur Israel. **Análise química quantitativa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.