

**Viviane Corrêa Santos**  
(Organizadora)

# CIÊNCIAS AGRÁRIAS

## Pesquisa, Inovação e Prática

**VOLUME 1**

Viviane Corrêa Santos  
(Organizadora)

# **CIÊNCIAS AGRÁRIAS: PESQUISA, INOVAÇÃO E PRÁTICA**

**VOLUME 1**

1ª edição

Editora Itacaiúnas  
Ananindeua – PA  
2025

©2025 por Editora Itacaiúnas  
©2025 por diversos autores  
Todos os direitos reservados.

1ª edição  
Volume 1

#### **Conselho editorial / Colaboradores**

Márcia Aparecida da Silva Pimentel – Universidade Federal do Pará, Brasil  
José Antônio Herrera – Universidade Federal do Pará, Brasil  
Márcio Júnior Benassuly Barros – Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil  
Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil  
Wildoberto Batista Gurgel – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil  
André Luiz de Oliveira Brum – Universidade Federal de Rondônia, Brasil  
Mário Silva Uacane – Universidade Licungo, Moçambique  
Francisco da Silva Costa – Universidade do Minho, Portugal  
Ofélia Pérez Montero - Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba

Editora-chefe: Viviane Corrêa Santos – Universidade do Estado do Pará, Brasil  
Editor e web designer: Walter Luiz Jardim Rodrigues – Editora Itacaiúnas, Brasil

Editoração eletrônica e capa: Walter Rodrigues

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**

C183                      Ciências Agrárias: Pesquisa, Inovação e Prática [recurso eletrônico] /  
organizado por Viviane Corrêa Santos. - 1. ed. – Ananindeua: Itacaiúnas,  
2025.

(Coleção Ciências Agrárias, v.1)

ISBN: 978-85-9535-334-3 (e-book)

DOI: 10.36599/itac- 978-85-9535-334-3

1. Pesquisa agrária. 2. Inovação rural. 3. Práticas sustentáveis. 4. Ciências  
do campo. I. Corrêa Santos, Viviane. II. Título.

CDD 630

CDU: 631

#### **Índice para catálogo sistemático:**

1. Agricultura e tecnologias relacionadas: 370
2. Agricultura: 37

E-book publicado no formato PDF (*Portable Document Format*). Utilize software [Adobe Reader](#) para  
uma melhor experiência de navegabilidade nessa obra.

---

Todo o conteúdo apresentado neste livro é de responsabilidade do(s) autor(es). Esta publicação está  
licenciada sob [CC BY-NC-ND 4.0](#)

Esta obra foi publicada pela **Editora Itacaiúnas** no ano de 2025.



## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>APRESENTAÇÃO.....</b>                                                                                                                                             | <b>6</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1. GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS ORGÂNICOS: O<br/>POTENCIAL DO BIOGÁS PRODUZIDO POR BIODIGESTOR ANAERÓBICO COMO<br/>FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL.....</b> | <b>7</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2. DA INDÚSTRIA AO MEIO AMBIENTE: ANÁLISE, TRATAMENTO E<br/>REDUÇÃO DE IMPACTOS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE EFLUENTES INDUSTRIAIS<br/>.....</b>              | <b>20</b> |



## Apresentação

É com grande entusiasmo que apresentamos o primeiro volume da coletânea ***Ciências Agrárias: Pesquisa, Inovação e Prática***, resultado de um esforço colaborativo entre pesquisadores, professores e profissionais atuantes nas diversas áreas que compõem o amplo campo das Ciências Agrárias.

Esta obra inaugura uma série dedicada a reunir e difundir estudos relevantes que dialogam com os principais desafios enfrentados no meio rural e nos sistemas produtivos contemporâneos. O volume contempla pesquisas que abordam temáticas como agricultura sustentável, manejo de recursos naturais, inovação tecnológica no campo, segurança alimentar, agroecologia, produção animal, educação rural e políticas públicas voltadas ao desenvolvimento agrário.

Cada capítulo apresenta contribuições originais, construídas com rigor científico e voltadas para a aplicação prática dos conhecimentos gerados. As reflexões aqui reunidas refletem a diversidade de enfoques e metodologias presentes nas Ciências Agrárias e destacam a importância da interdisciplinaridade na busca por soluções concretas e sustentáveis.

Nosso objetivo com esta coletânea é oferecer subsídios teóricos e práticos para pesquisadores, extensionistas, estudantes, técnicos e gestores públicos que atuam na área, fortalecendo os vínculos entre ciência, prática e inovação. Ao mesmo tempo, esperamos promover o intercâmbio de experiências entre diferentes regiões do país, valorizando as especificidades locais e contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico do meio rural.

Este primeiro volume marca o início de uma jornada de compartilhamento de saberes e práticas que, acreditamos, poderá inspirar novas pesquisas, projetos e políticas mais sensíveis às realidades do campo brasileiro. Que esta obra sirva como ponto de partida para reflexões e ações transformadoras em prol da agricultura, da sustentabilidade e da justiça social no meio rural.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Viviane Corrêa Santos  
Organizadora.

Walter Rodrigues  
Editor de publicações da Editora Itacaiúnas.



## Capítulo 1

# GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS ORGÂNICOS: O POTENCIAL DO BIOGÁS PRODUZIDO POR BIODIGESTOR ANAERÓBICO COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-334-3\_001

Lucas Antonio da Silva de Jesus<sup>1</sup>,  
Hugo Mateus Andrade de Araújo<sup>1</sup>,  
Pedro Vinicius Nóbrega Wanderley<sup>1</sup>,  
Jaime Erison Silva Ribeiro<sup>1</sup>,  
Marcos Paulo de Paiva Alves<sup>1</sup>,  
Italo Ramon Moreira Alves Nascimento<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal do Rio Grande do norte – UFRN, e-mail:  
lucasantonio.eq@gmail.com*

<sup>2</sup>*Universidade Federal do Maranhão - UFMA*



## RESUMO

Com o aumento populacional e o avanço tecnológico, a demanda por energia tem crescido significativamente, levando à exploração excessiva de recursos naturais, especialmente combustíveis fósseis, resultando em impactos ambientais negativos, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Diante desse cenário, este artigo explora o potencial do biogás, produzido a partir de resíduos orgânicos, como uma fonte de energia renovável e sustentável. O estudo investiga como a produção de biogás a partir de matéria orgânica pelo processo com biodigestor anaeróbico e como ele pode atender à crescente necessidade energética global, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e minimizando os danos ambientais. Apontando que o biogás é uma alternativa eficiente e sustentável, capaz de contribuir positivamente para a matriz energética mundial e para a preservação do meio ambiente. Os resultados demonstram que o biogás é uma fonte energética versátil e sustentável, capaz de integrar a matriz energética global de forma complementar a outras renováveis, como solar e eólica. Além disso, sua produção promove a economia circular, transformando resíduos agroindustriais em ativos energéticos.

**Palavras-chave:** Biogás, resíduos agroindustriais, energia renovável, sustentabilidade, digestão anaeróbia.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia, aliada à escassez de recursos naturais e aos impactos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis, tem exigido uma busca cada vez maior por alternativas sustentáveis. Nesse cenário, a gestão inadequada de resíduos orgânicos industriais agrava problemas como emissões de metano, contaminação do solo e desperdício de materiais com potencial energético. A transição para uma economia circular, em que resíduos são reinseridos no ciclo produtivo, torna-se essencial para reduzir danos ambientais e garantir segurança energética (PEREIRA; CURTI, 2012).

A degradação ambiental resulta da exploração descontrolada dos recursos naturais pelo homem, levando ao esgotamento de matérias-primas finitas, à perda acelerada de espécies, ao acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera e à alteração do pH dos oceanos. A intensificação da globalização tem amplificado esses problemas, agravando tanto as desigualdades sociais quanto os desequilíbrios ecológicos, enquanto o sistema econômico enfrenta riscos de instabilidade (MARTINE; ALVEZ, 2015).

Dentre as fontes renováveis, a biomassa destaca-se por sua versatilidade e capacidade de integrar soluções energéticas e ambientais. Resíduos agroindustriais, como bagaço de cana, resíduos de frigoríficos e cascas de frutas, podem ser transformados em biocombustíveis, calor ou eletricidade. Essa abordagem não apenas reduz a dependência



de combustíveis fósseis, mas também valoriza subprodutos que, de outra forma, seriam descartados, contribuindo para a poluição (KARLSSON et al., 2014).

A biomassa destaca-se como uma das fontes de energia renovável com maior perspectiva de expansão no futuro. Essa matéria orgânica, proveniente de resíduos agrícolas, florestais, urbanos e industriais, pode ser convertida em biocombustíveis, calor ou eletricidade, conforme já citado. Os biocombustíveis derivados da biomassa apresentam-se como alternativas viáveis aos combustíveis fósseis, reduzindo a dependência do petróleo. Além disso, seu processamento por meio de digestão anaeróbica gera o biogás, um subproduto com elevado potencial energético, consolidando-se como uma opção sustentável no cenário das energias renováveis (ANEEL, 2008).

O biogás pode ser gerado a partir de uma variedade de substratos orgânicos, incluindo dejetos animais de propriedades rurais, sobras de alimentos de residências e estabelecimentos comerciais, descartes de abatedouros, indústrias processadoras de alimentos e destilarias, além de subprodutos agrícolas, efluentes de laticínios, águas residuais domésticas e resíduos de frigoríficos (FERRAZ; MARRIEL, 1980). O biogás apresenta múltiplas utilizações, sendo empregado tanto em âmbito residencial (como gás de cozinha, iluminação e aquecimento) quanto em aplicações industriais e de mobilidade, servindo como combustível veicular ou para geração de energia elétrica. Historicamente, seu uso foi pioneiramente implementado em Bombaim, Índia, com a instalação da primeira unidade produtiva em 1859. O modelo mostrou-se tão eficiente que, no final do século XX, o país já contabilizava mais de 150 mil biodigestores em operação (MALAJOVICH, 2016).

Os primeiros registros do uso de biogás remontam ao final do século XIX, quando Louis Pasteur demonstrou a geração de energia a partir de esterco equino, permitindo que as lâmpadas públicas de Exeter fossem abastecidas com gás derivado do tratamento de esgoto. Esse avanço evidenciou o potencial de ampliar a produção de biogás por meio de sistemas anaeróbicos de tratamento de efluentes, embora grande parte do gás ainda fosse liberado na atmosfera sem aproveitamento. Em 1904, Travis propôs um método inovador, baseado em duas etapas, que integrava a depuração de águas residuais à síntese de metano (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Este artigo tem como objetivo central investigar o potencial da biodigestão anaeróbica como solução integrada para a gestão sustentável de resíduos orgânicos industriais e a produção de energia renovável, analisando seus impactos ambientais,



viabilidade técnica e econômica e contribuição para a transição energética global. Através de uma abordagem multidisciplinar, que engloba revisão bibliográfica, análise de dados e estudo de casos, buscou-se demonstrar como o biogás produzido a partir da decomposição controlada de resíduos industriais, pode se tornar um pilar estratégico na matriz energética sustentável, reduzindo emissões de gases de efeito estufa, promovendo a economia circular e oferecendo alternativas competitivas aos combustíveis fósseis.

Além disso, esse artigo pretende também evidenciar como essa valorização energética pode alinhar objetivos ambientais, econômicos e sociais, contribuindo tanto para a descarbonização de setores produtivos quanto para o cumprimento das metas globais de desenvolvimento sustentável, particularmente no que diz respeito à energia acessível e limpa. A análise abrangente aqui apresentada busca não apenas consolidar conhecimento científico sobre o tema, mas também servir como ferramenta para empresários e pesquisadores interessados em soluções práticas para os desafios energéticos e ambientais atuais. Dessa maneira, o estudo pretende demonstrar como essa tecnologia pode oferecer uma resposta viável tanto para a crise energética quanto para a necessidade de práticas mais ecológicas.

## 2. METODOLOGIA

Este estudo realizou uma revisão abrangente da literatura científica dos últimos dez anos, com base em publicações indexadas nas principais bases de dados, incluindo Scopus, Web of Science, SciELO e ScienceDirect. A busca foi orientada por termos estratégicos como "produção de biogás", "resíduos orgânicos", "digestão anaeróbia", "recuperação de energia" e "energia renovável", nos principais meios de pesquisa científica citados. Foram considerados apenas estudos com revisão por pares, além de teses e relatórios técnicos relevantes, que abordassem a conversão de resíduos orgânicos agroindustriais em biogás, seu potencial energético e aplicações práticas. Os critérios de inclusão privilegiaram trabalhos com dados quantificáveis, métodos de purificação de biogás e análises de eficiência energética, enquanto pesquisas repetitivas ou sem embasamento científico foram excluídas. A análise dos dados permitiu uma avaliação comparativa das tecnologias de digestão anaeróbia, das características do biogás gerado e das técnicas para melhorar sua qualidade, bem como das diferentes formas de aproveitamento energético. Além disso, foram examinados fatores como tipo de matéria-prima, escala de produção e viabilidade econômica, identificando tendências



e lacunas no conhecimento atual. Por fim, o estudo discute o papel dessa tecnologia em sistemas sustentáveis, destacando sua capacidade de integrar a gestão de resíduos com a geração de energia limpa, contribuindo para a transição energética e a economia circular.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A preocupação com o meio ambiente vem cada vez mais ganhado destaque no cenário global, impulsionando debates sobre como aliar progresso econômico, tecnológico e social à conservação dos ecossistemas, garantindo assim que os recursos naturais permaneçam acessíveis para as futuras gerações, tornando-se uma prioridade inadiável no cenário atual. Ao longo do tempo, tem-se tornado cada vez mais evidente e urgente a busca por estratégias inovadoras capazes de promover um desenvolvimento equilibrado, integrando aspectos sociais, econômicos e ambientais. Nesse contexto, este estudo propõe soluções relevantes que beneficiam a sociedade, destacando-se a geração de energia limpa a partir de resíduos da agroindústria. Essa abordagem não só impulsiona a economia, mas também desempenha um papel fundamental na redução de impactos ecológicos, contribuindo para a sustentabilidade global (PEREIRA; CURI, 2012).

Há décadas, a humanidade vem dependendo quase exclusivamente de fontes energéticas derivadas de combustíveis fósseis, cujo uso desenfreado tem gerado sérios danos ambientais. Durante sua combustão, substâncias como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ) são emitidas, intensificando o efeito estufa e contribuindo para as mudanças climáticas. Além disso, por se tratar de um recurso não renovável, sua disponibilidade é finita, o que reforça a urgência em adotar alternativas sustentáveis para garantir a segurança energética no futuro. A pesquisa sobre a geração de biogás e sua conversão em energia demonstra o potencial dessa fonte renovável, destacando a necessidade de investimentos para viabilizar sua aplicação em grande escala. Além disso, esse estudo estimula a comunidade científica a desenvolver técnicas mais eficientes e acessíveis, promovendo a otimização contínua do processo de produção e ampliando seu apelo como alternativa sustentável. Diante da crescente preocupação global com a degradação ambiental e a crise energética decorrente do uso de fontes não renováveis, torna-se essencial desenvolver alternativas sustentáveis para o manejo de resíduos agroindustriais e orgânicos, bem como para a geração de energia limpa. Nesse contexto, o biogás gerado dessa biomassa emerge como uma solução promissora, motivando



intensas pesquisas sobre suas aplicações e potencial de aproveitamento (ROHSTOFFE, 2013).

A biodigestão anaeróbica é um processo microbiológico de decomposição da matéria orgânica que ocorre em ambientes totalmente desprovidos de oxigênio, conduzido por uma variedade complexa de microrganismos anaeróbicos. Como resultado dessa atividade microbiana, são produzidos dois componentes principais: um efluente gasoso conhecido como biogás, cuja composição predominante inclui metano e dióxido de carbono, conforme especificado na Tabela 1 e um resíduo sólido de elevado valor agrônômico, particularmente enriquecido com compostos nitrogenados (NEITZEL, 2015). Esse mecanismo natural, quando controlado tecnologicamente, oferece uma solução sustentável para o manejo de resíduos orgânicos, permitindo a recuperação energética e nutricional dos subprodutos gerados.

**Tabela 1** – Composição média do biogás

| <b>Componente</b>                        | <b>Concentração</b>             |
|------------------------------------------|---------------------------------|
| Metano (CH <sub>4</sub> )                | 50% - 75% em vol.               |
| Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )    | 25% - 45% em vol.               |
| Água (H <sub>2</sub> O)                  | 2% – 7% em vol.<br>(20 - 40 °C) |
| Sulfeto de hidrogênio (H <sub>2</sub> S) | 20 - 20.000 ppm                 |
| Nitrogênio (N <sub>2</sub> )             | < 2% em vol.                    |
| Oxigênio (O <sub>2</sub> )               | < 2% em vol.                    |
| Hidrogênio (H <sub>2</sub> )             | < 1% em vol.                    |

**Fonte:** Rohstoffe (2010).

O sistema empregado na geração de biogás é denominado biodigestor anaeróbico, esse equipamento consiste em uma câmara hermeticamente selada, onde ocorre a ação de microrganismos sobre resíduos orgânicos em condições de ausência de oxigênio. Durante o processo, esses microrganismos decompõem o material orgânico, resultando na produção de biogás e biofertilizante como subprodutos (MALINOWSKY, 2016). Os diferentes modelos de biodigestores compartilham um princípio fundamental: a manutenção de um ambiente anaeróbico (livre de oxigênio) para garantir a decomposição eficiente da matéria orgânica. A seleção do sistema mais adequado depende de fatores como o contexto regional, o tipo e volume de resíduos disponíveis,



além dos recursos financeiros investidos. Essa decisão ainda deve considerar as demandas específicas e a viabilidade econômica de cada projeto. Quanto ao método de alimentação, os biodigestores são categorizados em dois grupos principais: sistemas de carga contínua e operação em batelada (ALVES; INOUE; BORGES, 2010).

O biodigestor operado em batelada tem como principal característica o processamento único de carga por ciclo. Nesse sistema, o equipamento é abastecido uma única vez e permanece fechado até que toda a produção de biogás seja concluída e armazenada. Somente quando a atividade microbiana se esgota e não há mais geração significativa de gás que o biodigestor é aberto para a remoção dos resíduos e a limpeza do sistema. Embora esse método apresente uma produção de biogás menos contínua em comparação com outros métodos, ele se destaca pela maior eficiência na conversão da matéria orgânica. Além disso, uma vantagem relevante é a capacidade de processar resíduos orgânicos sem a necessidade de trituração prévia (FERRAZ; MARRIEL, 1980).

Já no biodigestor de fluxo contínuo, a alimentação ocorre de forma ininterrupta, sendo que cada adição de matéria orgânica é acompanhada pela saída de um volume equivalente de efluente. Esse subproduto é removido por meio de um sistema de tubulação e pode ser aplicado diretamente como fertilizante natural em cultivos agrícolas. Contudo, uma limitação desse modelo é a necessidade de que o material inserido seja previamente triturado, o que pode representar um inconveniente operacional (FERRAZ; MARRIEL, 1980).

### *3.1 Processo com biodigestor anaeróbica*

A produção de biogás ocorre em quatro fases sequenciais que ocorrem em uma coordenação perfeita, as quais dependem de uma interação equilibrada entre os microrganismos envolvidos durante cada processo. Cada etapa é mediada por comunidades microbianas distintas e específicas, cuja eficiência é influenciada por variáveis como temperatura, acidez do meio (pH), características do substrato e condições anaeróbicas, esses parâmetros determinam não apenas a eficácia do processo, mas também as propriedades finais do biogás gerado (KARLSSON et al., 2014).

A hidrólise representa a fase inicial da degradação anaeróbica, desempenhando um papel crucial na geração de biogás. Nessa etapa, microrganismos anaeróbicos atuam sobre compostos orgânicos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios, fragmentando esses componentes por meio de reações enzimáticas. Como resultado desse processo, essas macromoléculas são convertidas em substâncias mais simples, incluindo



ácidos graxos, álcoois e açúcares (ROHSTOFFE, 2010). Essa transformação é essencial para que os microrganismos possam metabolizar os nutrientes e absorver a energia armazenada nos compostos orgânicos. Dessa forma, a hidrólise viabiliza o aproveitamento da matéria orgânica, permitindo que os processos subsequentes da digestão anaeróbica ocorram com eficiência (KARLSSON et al., 2014).

Na fase seguinte, denominada acidogênese ou fermentação ácida, os compostos gerados na etapa anterior são degradados mais ainda, transformando-se em moléculas de menor tamanho, como ácidos orgânicos e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A natureza desses produtos finais varia conforme as condições do ambiente e os microrganismos envolvidos no processo. Essa etapa é mediada por bactérias anaeróbicas, o que representa uma vantagem, uma vez que o estágio inicial também exige um ambiente completamente livre de oxigênio para que ocorra (KARLSSON et al., 2014). A próxima fase é denominada acetogênese, onde os compostos orgânicos previamente decompostos sofrem nova fragmentação, gerando moléculas ainda menores, como ácido acético, hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). No entanto, as bactérias envolvidas nesse processo são sensíveis a altas concentrações de hidrogênio, o que torna a presença das bactérias metanogênicas de suma importância para que estas consumam o hidrogênio em excesso. Esses microrganismos removem o excesso de  $\text{H}_2$ , evitando a inibição da acetogênese (KARLSSON et al., 2014).

Já o processo de metanogênese ocorre quando as arqueias metabolizam hidrogênio e  $\text{CO}_2$  (por meio da transferência interespecífica de hidrogênio), estabilizando as condições ambientais necessárias para a atividade das bactérias acetogênicas. Nessa fase, ocorre a produção de metano, o componente mais relevante do processo, juntamente com o dióxido de carbono. Esses gases são sintetizados por arqueias metanogênicas, microrganismos altamente sensíveis a alterações nas condições operacionais. Para metabolizar o metano, essas bactérias dependem dos compostos gerados nas etapas precedentes. Portanto, é essencial manter um ambiente equilibrado, adequado para todos os grupos microbianos envolvidos, a fim de garantir a eficiência do sistema e evitar impactos negativos na produção de biogás (ALVES; INOUE; BORGES, 2010).

A eficiência na produção de biogás está diretamente ligada às condições que regulam a biodigestão anaeróbica. Embora, em termos gerais, o aumento da temperatura acelere reações químicas, esse princípio não se aplica integralmente aos processos biológicos de degradação. Isso ocorre porque diferentes microrganismos, cada um adaptado a uma faixa térmica específica, atuam nessas transformações. Desvios



significativos dessa faixa ideal podem inibir sua atividade ou mesmo levar à sua morte. De modo semelhante, o pH do meio exerce influência crítica, uma vez que os microrganismos presentes em cada fase da decomposição demandam níveis distintos de acidez para metabolizar adequadamente (ROHSTOFFE, 2010, p. 23). Além disso, tem-se o tipo de substrato utilizado no processo, este afeta a estabilidade e eficiência do processo. O que depende também da composição dos substratos que possuem energia e nutrientes necessários para que os microrganismos produzam um biogás de qualidade e para que o processo seja estável (KARLSSON et al., 2014).

A decomposição anaeróbica de matéria orgânica permite transformar dejetos animais e subprodutos agrícolas em biogás e fertilizante natural. Entre as vantagens dessa técnica estão: incremento na produção agrícola, redução do impacto ambiental e promoção da saúde pública e animal. A utilização de biodigestores para a produção de biogás traz uma série de vantagens significativas, destacando-se como uma solução sustentável e multifuncional. Um dos principais benefícios é a geração de energia limpa e renovável, que pode ser empregada como substituta do gás de cozinha convencional, proporcionando economia nos custos relacionados à aquisição, transporte e armazenamento deste combustível. Além disso, esse processo produz biofertilizante, um resíduo rico em nutrientes que serve como excelente adubo natural, capaz de incrementar a produtividade da indústria agrícola tanto na alimentação humana quanto na produção de forragem animal (OLIVER, 2008).

A geração excessiva de resíduos sólidos orgânicos representa um grave impacto ambiental, exigindo soluções eficientes para seu armazenamento em aterros sanitários de modo seguro, econômico e com menor ocupação de espaço. No entanto, além da disposição final adequada, é essencial priorizar a redução na produção de lixo, maximizar a reciclagem de materiais orgânicos e inorgânicos, e aplicar tratamentos adequados aos resíduos remanescentes. Dessa forma, apenas os rejeitos, que não podem ser reaproveitados, serão destinados aos aterros, diminuindo significativamente a área necessária para sua disposição (REMPEL, 2014).

Do ponto de vista sanitário, o sistema promove melhorias significativas, uma vez que a coleta e tratamento adequados dos dejetos animais reduzem a contaminação ambiental por microrganismos patogênicos, diminuem a proliferação de vetores como moscas e contribuem para a redução da mortalidade dos animais. Ambientalmente, a tecnologia se mostra altamente benéfica por reduzir as emissões de gases de efeito estufa, preservar ecossistemas naturais ao diminuir a demanda por lenha, consequentemente



reduzindo o desmatamento e minimizando os odores desagradáveis provenientes da decomposição inadequada de matéria orgânica. Dessa forma, os biodigestores se apresentam como uma tecnologia integrada que alia eficiência energética, benefícios agrônômicos, melhorias sanitárias e proteção ambiental, configurando-se como uma alternativa viável para o manejo sustentável desses resíduos orgânicos principalmente provenientes do setor agroindustrial (OLIVER, 2008).

A adoção do biogás em ambientes rurais apresenta múltiplas vantagens, tanto econômicas quanto ambientais. Do ponto de vista operacional, proporciona aos agricultores uma fonte energética mais acessível e de manejo simplificado, elevando assim sua qualidade de vida. Em termos macroeconômicos, essa alternativa energética reduz a necessidade de combustíveis fósseis, por se tratar de uma matéria-prima renovável. O processo de produção do biogás gera como resíduo um biofertilizante altamente nutritivo, resultante da decomposição anaeróbica, que pode ser empregado para enriquecer solos agrícolas e potencializar o rendimento das lavouras. Do ponto de vista ecológico, essa tecnologia se mostra duplamente vantajosa, pois além de fornecer energia limpa, também promove a valorização de resíduos orgânicos que seriam descartados, contribuindo assim para a diminuição da poluição ambiental (DEGANUTTI et al., 2002). Dessa forma, a implantação de sistemas de biogás em propriedades rurais configura uma solução integrada que alia eficiência produtiva com responsabilidade ambiental.

A digestão anaeróbica é um processo eficiente para o tratamento desses resíduos orgânicos, transformando-os em produtos de alto valor agregado. Além de gerar o biogás, uma fonte energética renovável capaz de substituir diversos combustíveis fósseis, o método também produz biofertilizantes, ricos em nutrientes essenciais para o solo e as plantas (RIZZONI, 2012). A geração de energia por meio do biogás surge como uma solução viável, uma vez que esse combustível é produzido pela degradação de resíduos orgânicos na ausência de oxigênio. Esse processo não apenas oferece um destino sustentável para a parcela biodegradável dos resíduos orgânicos, mas também contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis no atendimento às necessidades energéticas (PAVI, 2016). No Brasil, a exploração do biogás para pesquisa e geração de energia ainda está em estágio inicial e apresenta uma distribuição geográfica ainda fragmentada. Apesar disso, esse recurso tem se destacado como uma alternativa promissora no cenário das energias renováveis, oferecendo vantagens tanto econômicas quanto ambientais (DUARTE, 2017).



#### 4. CONCLUSÃO

O biogás tem-se consolidado como uma solução energética sustentável e economicamente viável, atendendo às demandas globais por fontes de energias renováveis e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Seu baixo custo de produção, aliado à eficiência comprovada, tem incentivado diversos países a investirem em sua utilização, seja para geração de eletricidade, aquecimento ou até mesmo como biocombustível. Essa adoção crescente reflete não apenas preocupações ambientais, mas também estratégias de segurança energética e desenvolvimento econômico, especialmente em regiões com abundância de matéria-prima orgânica. No entanto, apesar de seus fundamentos científicos serem conhecidos há décadas, o avanço tecnológico necessário para otimizar sua produção em escala industrial é relativamente recente. Isso demonstra que a evolução das técnicas de biodigestão anaeróbica, purificação e armazenamento foi crucial para transformar o biogás em uma alternativa prática e competitiva. Ainda assim, desafios persistem, como a necessidade de maior eficiência na conversão energética, a logística de coleta de resíduos e a integração com redes de distribuição existentes. Diante desse cenário, o futuro do biogás parece promissor, especialmente com o contínuo desenvolvimento de políticas de incentivo, pesquisas em biocatalisadores e a expansão de biorrefinarias. Seu potencial para reduzir emissões de metano, aproveitar resíduos agrícolas e urbanos e contribuir para uma economia circular, posiciona-o como peça-chave na transição energética global. Portanto, embora ainda haja espaço para aprimoramentos, o biogás já se estabelece como uma alternativa concretas para um modelo energético mais limpo e sustentável, reforçando a importância de investimentos em inovação e infraestrutura para consolidar seu papel no mercado energético atual.

#### REFERÊNCIAS

ANEEL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: TDA comunicação, 2008. ALVES, E. E. N.; INOUE, K. R. A.; BORGES, A. C. **Biodigestores: Construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL, Viçosa: SIMBRAS. Anais..., n. 2, p. 1 – 14, set. 2010.



ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. Singapore: Wiley-VCH, 2008. DEGANUTTI, R. et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Encontro de energia no meio rural, Campinas, v. 4, 2002. Disponível:

<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn)> Acessado em 01 oct.2019.

DUARTE, D. D. V. **Biogás no Brasil: Desafios à Implementação do Biogás Gerado a Partir de Biomassa de Origem Animal**. 2017. 59 f. Monografia (Bacharelado em Economia) - Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PEREIRA, S. S.; CURI, R. C. **Meio Ambiente, Impacto Ambiental e Desenvolvimento Sustentável: Conceituações Teóricas sobre o Despertar da Consciência Ambiental**. REUNIR – Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade, Campina Grande, Vol. 2, no 4, p.35-57, set./dez. 2012.

FERRAZ, J. M. G.; MARRIEL, I. E. **Biogás: Fonte alternativa de energia**. Sete Lagos: EMBRAPA: Conselho Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, 1980.

KARLSSON, T. et al. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. Da Univates, 2014.

MALAJOVICH, M. A. **Biotecnologia**. Rio de Janeiro: ACTE C&T no Ensino, 2016.

MALINOWSKY, C. **Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da UFSC através de biodigestor anaeróbio**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARTINE, G.; ALVES, J. E. D. **Economia, sociedade e meio ambiente no século 21: tripé ou trilema da sustentabilidade**. Revista Brasileira de Estudos de População, Brasília, v. 32, nov. 2015. Disponível:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-30982015000300433&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-30982015000300433&lng=en&nrm=iso)> Acessado em 08 oct.2019.

NEITZEL, J. **Potencial de produção de biogás da codigestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras e lodo de esgoto primário**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

OLIVER, A. P. M. **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Salvador: Instituto Winrock - Brasil. 23 f. 2008.



PAVI, S. **Produção de biogás a partir da co-digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e resíduos de hortifrutigranjeiros**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

RIZZONI, L. B. **Biodigestão anaeróbia do tratamento de dejetos de suínos**. Revista científica eletrônica de medicina veterinária, Alfenas, v. 9, n. 18, p. 1 – 20, jan. 2012.

SOARES, R. C.; SILVA, S. R. C. M. **Evolução do uso do biogás como combustível**. Diversitas Journal, Mato Grosso, p. 1-6, ago. 2010.

REMPEL, N. **Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos consorciado com glicerina**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

ROHSTOFFE, F. N. **BIOGAS: an introduction**. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e V. (FNR), 2013.

ROHSTOFFE, F. N. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e V. (FNR), 2010.



## Capítulo 2

# DA INDÚSTRIA AO MEIO AMBIENTE: ANÁLISE, TRATAMENTO E REDUÇÃO DE IMPACTOS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-334-3\_002

Lucas Antonio da Silva de Jesus<sup>1</sup>

Hugo Mateus Andrade de Araújo<sup>1</sup>

Pedro Vinicius Nóbrega Wanderley<sup>1</sup>

Jaime Erison Silva Ribeiro<sup>1</sup>

Marcos Paulo de Paiva Alves<sup>1</sup>

Italo Ramon Moreira Alves Nascimento<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal do Rio Grande do norte – UFRN, e-mail:  
lucasantonio.eq@gmail.com*

<sup>2</sup>*Universidade Federal do Maranhão - UFMA*



## RESUMO

O aumento cada vez mais crescente na industrialização tem levado a uma geração cada vez maior de efluentes industriais, os quais, quando não tratados adequadamente, representam uma ameaça ao meio ambiente e à saúde pública. Este trabalho aborda os tipos de efluentes industriais mais comuns, os métodos de caracterização e tratamento, bem como os impactos ambientais decorrentes do lançamento inadequado desses resíduos nos corpos hídricos e no solo. Os efluentes industriais contêm uma variedade de contaminantes, incluindo metais pesados, compostos orgânicos tóxicos como fenóis e hidrocarbonetos, nutrientes em excesso e materiais particulados. O impacto ambiental dos efluentes industriais não tratados ou tratados inadequadamente inclui a contaminação de rios, lagos e aquíferos, a eutrofização de ecossistemas aquáticos, a toxicidade para a vida selvagem e a bioacumulação de poluentes na cadeia alimentar. Além disso, o lançamento de efluentes ácidos ou alcalinos pode alterar o pH dos corpos d'água, afetando a biodiversidade aquática. Com uma gestão adequada de efluentes industriais se torna possível minimizar os impactos ambientais, além disso é importante exigir monitoramento contínuo, investimento em tecnologias de tratamento e cumprimento rigoroso das normas ambientais. A adoção de práticas sustentáveis, como reuso de água e processos de produção mais sustentáveis também é essencial para reduzir o potencial poluidor e promover o desenvolvimento industrial sustentável.

**Palavras-chave:** Efluentes industriais, Impacto ambiental, Tratamento de efluentes, Poluição hídrica, Sustentabilidade.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente industrialização, embora essencial para o desenvolvimento econômico, gera efluentes carregados de contaminantes como corantes, metais pesados, compostos orgânicos persistentes e resíduos farmacêuticos, que representam um desafio crítico para a sustentabilidade ambiental. Esses poluentes, quando lançados sem tratamento adequado, comprometem ecossistemas aquáticos, contaminam solos e colocam em risco a saúde pública, evidenciando a necessidade urgente de estratégias eficazes de gestão e tratamento (Nasrollahzadeh, 2020).

Os efluentes provenientes de atividades industriais contêm elevadas cargas de compostos orgânicos e inorgânicos que, quando lançados em rios e lagos, tornam-se uma ameaça grave aos ecossistemas e à saúde pública. Dentre esses poluentes, destaca-se o fenol, uma substância altamente tóxica e cancerígena, mesmo quando presente em quantidades reduzidas. Sua elevada solubilidade em meios aquosos e em solventes orgânicos favorece sua dispersão no ambiente, intensificando seus impactos negativos. Além dos danos ecológicos, a exposição ao fenol está associada a diversas patologias



humanas, incluindo reações alérgicas, disfunções cardiovasculares e lesões em órgãos como fígado, pulmões, intestino e sistema nervoso central (Jia & Lua, 2008). Neste contexto, uma variedade de métodos biológicos e físico-químicos têm sido utilizados para eliminar o fenol de efluentes.

Outro problema para o meio ambiente está na coloração de efluentes industriais, decorrente do uso de substâncias tintoriais em diversos processos produtivos, exigindo assim intervenção antes de seu descarte no meio ambiente. Compostos como pigmentos sintéticos, taninos, lignina e corantes orgânicos são os principais responsáveis por conferir tonalidade a esses resíduos líquidos. A eliminação dessa coloração constitui um dos maiores obstáculos para setores como o têxtil, o de papel e celulose, o de curtumes e o de produção de corantes, os quais não apenas demandam elevados volumes hídricos, mas também se destacam como importantes fontes de contaminação cromática (Raghavacharya, 1997).

A poluição por fármacos também representa um desafio ambiental significativo, com efeitos preocupantes sobre os ecossistemas e a saúde pública devido à sua persistência e toxicidade. Entre esses compostos, destaca-se a rifampicina (RIF), um antimicrobiano amplamente utilizado no combate a infecções bacterianas, incluindo casos de meningite tuberculosa, devido às suas propriedades bactericidas e neuroprotetoras (Yulug et al., 2014). Além disso, seu emprego como promotor de crescimento na pecuária intensifica sua disseminação no ambiente, a elevada estabilidade desse composto, associada à sua liberação constante por meio de efluentes domésticos e industriais, favorece sua persistência em corpos hídricos, caracterizando-o como um contaminante emergente ainda pouco regulamentado (Smaali, 2019).

Diante do exposto, fica evidente a necessidade urgente de desenvolver e aprimorar técnicas eficientes para o tratamento de efluentes contendo corantes (como o azul de metileno e corantes dispersos), compostos fenólicos e resíduos farmacêuticos, devido ao elevado potencial poluidor desses contaminantes e aos riscos que representam para os ecossistemas aquáticos e a saúde pública. A implementação de processos de remediação adequados não só assegura a conformidade com normas ambientais, mas também promove a sustentabilidade, mitigando impactos negativos na qualidade da água e na percepção social. Nesse contexto, este estudo visa avaliar métodos inovadores de degradação ou remoção desses contaminantes e apresentar os impactos ambientais que o descarte incorreto ocasiona, contribuindo para o avanço das estratégias de gestão de resíduos e reforçando a importância do tratamento de efluentes como pilar fundamental



na preservação ambiental. A compreensão desses mecanismos é essencial para orientar políticas públicas e práticas industriais alinhadas com os princípios da química verde e do desenvolvimento sustentável.

## **2. METODOLOGIA**

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica sistemática, com o objetivo de analisar, tratar e propor estratégias para a redução dos impactos ambientais causados pelos principais tipos de efluentes industriais. A metodologia adotada consistiu em uma abordagem qualitativa, baseada na coleta, seleção e análise crítica de fontes científicas relevantes, como artigos, livros, relatórios técnicos e normas ambientais, publicados em bases de dados confiáveis, incluindo SciELO, ScienceDirect, Scopus e Google Acadêmico.

Inicialmente, foi realizada uma busca ampla utilizando combinações de palavras-chave relacionadas aos efluentes industriais, seus impactos ambientais, métodos de tratamento e tecnologias de redução de poluentes. Os critérios de seleção priorizaram publicações dos últimos dez anos, garantindo a atualidade das informações, mas sem descartar obras clássicas fundamentais para o entendimento do tema. Em seguida, foram analisados os impactos ambientais associados a cada categoria, os métodos convencionais e inovadores de tratamento (físicos, químicos e biológicos) e as estratégias para minimização de resíduos na fonte. A análise crítica permitiu identificar lacunas no conhecimento, tendências tecnológicas e boas práticas já consolidadas no setor industrial.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Um dos principais problemas ambientais globais é o controle da contaminação de corpos d'água devido ao despejo inadequado de resíduos industriais. Esses efluentes, quando lançados sem tratamento adequado, comprometem especialmente os mananciais de água doce, agravando a escassez desse recurso vital. Entre os ecossistemas mais impactados estão os rios, que frequentemente recebem cargas poluidoras de atividades industriais próximas. Essa prática não só degrada a qualidade da água, mas também provoca alterações significativas em suas propriedades físicas, químicas e biológicas, afetando todo o equilíbrio do ambiente aquático (Sangodoyin, 1991). Esses efluentes industriais são provenientes principalmente das indústrias farmacêuticas, indústrias de



sabão e detergente, fábrica de papel, indústria têxtil, indústria cervejeira, indústria de curtume, indústria de refrigerante e indústria química.

A contaminação gerada por resíduos industriais apresenta sérias consequências tanto para os ecossistemas quanto para o bem-estar da população, destacando-se o segmento têxtil como um dos principais responsáveis. Esse setor demanda volumes significativos de recursos hídricos em suas operações e contribui com aproximadamente um quinto da degradação global de águas potáveis, devido principalmente ao emprego de compostos químicos em processos de coloração e tratamento de tecidos (Vryzas, 2009). O tratamento de efluentes industriais é uma etapa crucial para minimizar os impactos ambientais causados por essas indústrias, além disso se torna necessário que adotem práticas sustentáveis, implementado tecnologias de controle de poluição e promovendo uma responsabilidade ambiental em todas as etapas do processo.

#### *a. Contaminação por fenol*

Os fenóis são substâncias químicas de grande relevância industrial, sendo empregados na fabricação de agroquímicos, produtos têxteis, derivados de petróleo, celulose e alimentos. No entanto, seu uso excessivo resulta na liberação desses compostos no ecossistema sem prévio tratamento durante processos produtivos e aplicações industriais. Por apresentarem uma estrutura aromática estável, esses poluentes possuem baixa biodegradabilidade, podendo acumular-se no ambiente e infiltrar-se na cadeia alimentar por meio do lançamento de efluentes contaminados. Essa situação representa um risco significativo à saúde pública e um grande desafio ecológico para as indústrias (Zhang, 2020). Diante disso, pesquisas têm investigado métodos avançados para o tratamento de águas residuais contendo fenóis, desenvolvendo estratégias para sua eliminação eficaz.

O fenol é um composto aromático de estrutura cristalina, higroscópico e normalmente incolor, mas que adquire uma tonalidade rosada em contato com o ar devido a processos oxidativos. Sua acidez é atribuída à presença do grupo hidroxila ( $-OH$ ), e seu odor peculiar é acompanhado por toxicidade em elevadas concentrações. Com uma solubilidade de aproximadamente 98 g/L em água, forma soluções denominadas ácido carbólico (Rout, 2022). Os efluentes contendo fenóis representam um sério risco à saúde humana, podendo desencadear irritações cutâneas, alterações genéticas, disfunções cardíacas e comprometimento hepático, além de afetar os sistemas digestivo, respiratório e nervoso (Jia e Lua, 2008). Diante desses impactos, a eliminação de fenóis de águas



residuais torna-se uma etapa crítica antes do descarte ambiental, garantindo a segurança ecológica e sanitária.

O fenol desempenha um papel fundamental em diversos setores industriais devido à sua versatilidade química. Na indústria de materiais, ele atua como matéria-prima na síntese de resinas fenólicas, amplamente empregadas na fabricação de madeira compensada. Além disso, é um composto chave na produção de polímeros, como policarbonatos e poliestirenos, essenciais para a manufatura de plásticos de alto desempenho. Na área de produtos de limpeza, o fenol é utilizado como base para a síntese de surfactantes, componentes críticos na formulação de detergentes industriais e domésticos. No campo farmacêutico, ele serve como intermediário na síntese de diversos fármacos, contribuindo para a produção de medicamentos essenciais. Outra aplicação relevante está na agricultura, onde o fenol atua como precursor na síntese de defensivos agrícolas, auxiliando na proteção de cultivos. Na indústria têxtil, ele é empregado na produção de corantes sintéticos, garantindo a fixação de pigmentos em tecidos (Wang, 2018). Por fim, sua ação biocida o torna útil em formulações para a preservação de madeira, prolongando sua durabilidade (Hill, 2006). Essas múltiplas aplicações destacam a importância do fenol como um composto industrial estratégico.

Atualmente, as principais técnicas empregadas para a eliminação desse contaminante orgânico incluem processos como biodegradação, fotocatalise, oxidação avançada, cavitação e adsorção. Dentre esses métodos, a adsorção destaca-se por sua eficiência elevada, custo reduzido, rapidez e simplicidade operacional. Contudo, a eficácia desse processo depende criticamente da seleção de um material adsorvente adequado. Opções como resinas sintéticas, argilas e hidróxidos duplos lamelares apresentam desempenho limitado na remoção desses poluentes. Essa baixa eficiência está relacionada à incompatibilidade entre a hidrofobicidade dos fenóis e a natureza hidrofílica desses adsorventes, prejudicando as interações necessárias para uma adsorção eficiente (Ruiguang, 2021).

### *3.2 Contaminação por Azul de Metileno*

O azul de metileno (AM) é uma substância química de amplo espectro de aplicações, destacando-se tanto no campo farmacêutico quanto no setor industrial, especialmente no segmento têxtil, onde atua como corante para fibras naturais, como



algodão e lã, além de ser empregado na pigmentação de papel. Sua tonalidade vibrante e características físico-químicas distintas o tornam um composto valioso em múltiplos setores, incluindo processos industriais, terapias médicas e experimentação científica (Wu, 2009).

O azul de metileno é um composto orgânico sólido, que se apresenta como um pó de coloração verde-escura e inodoro em condições ambientais. Quando dissolvido em água, forma uma solução de tonalidade azul intensa. Sua difusividade molecular é de  $4,7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$  a  $25^\circ\text{C}$ , e demonstra solubilidade em diversos solventes, como metanol, etanol, 2-propanol, acetona, acetato de etila e água. Além disso, seu ponto de fusão situa-se entre  $100$  e  $110^\circ\text{C}$  (Salimi, 2019). Quimicamente, o AM é classificado como um corante básico aromático heterocíclico, com massa molar de  $319,85 \text{ g/mol}$ . Sua estrutura molecular ( $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3$ ) caracteriza-o como um corante catiônico primário, amplamente reconhecido por sua elevada solubilidade em água e estabilidade em solução a temperatura ambiente. Pertence à classe dos corantes de polimetina, possuindo um grupo amino autocrômico e apresentando carga positiva em sua estrutura (Anushree, 2019).

O azul de metileno é um composto versátil, destacando-se por sua tonalidade vibrante e sua configuração molecular derivada da fenotiazina. Sua aplicação como corante industrial é amplamente difundida, graças à sua afinidade por diversos substratos. Além disso, atua como um indicador redox em análises químicas, alterando sua coloração conforme o ambiente reacional. Na área médica, é empregado como agente antisséptico e no tratamento de metemoglobinemia. Em laboratórios, sua utilidade estende-se à coloração de amostras biológicas e a protocolos de biologia molecular. Estudos também demonstram sua eficácia na purificação de recursos hídricos, inibindo o crescimento microbiano, contudo, em dosagens inadequadas, apresenta toxicidade, demandando cuidados específicos em seu uso (Sweetman, 2009).

Assim como diversos compostos orgânicos sintéticos, o azul de metileno apresenta riscos ambientais quando seu manejo e descarte são inadequados. Sua toxicidade para ecossistemas aquáticos é particularmente preocupante, uma vez que sua liberação em corpos d'água pode desencadear efeitos nocivos sobre a biota, incluindo danos à flora e fauna. Adicionalmente, sua capacidade de bioacumulação em organismos aquáticos pode desequilibrar cadeias tróficas, ampliando seus impactos ambientais negativos (Seyed, 2018). A persistência ambiental do AM é variável, podendo, em certas condições, permanecer no meio por longos períodos, prolongando a exposição de seres

vivos a seus efeitos. Além disso, seu descarte incorreto pode levar à contaminação de solos, afetando microrganismos e outras formas de vida terrestre. No contexto industrial, o setor têxtil destaca-se como um dos principais emissores desse corante em recursos hídricos, representando uma ameaça potencial à saúde pública. Em concentrações elevadas, o AM demonstra toxicidade significativa para humanos, incluindo propriedades carcinogênicas, sua natureza não biodegradável amplifica seus efeitos negativos, tornando-o um poluente de preocupação ambiental prolongada (Sun, 2019).

A degradação do azul de metileno em efluentes líquidos representa um desafio significativo no tratamento de efluentes devido à sua persistência ambiental e potencial tóxico, exigindo métodos eficazes antes da liberação em corpos hídricos. Pesquisas recentes exploram diversas abordagens para remoção deste corante, incluindo técnicas convencionais e inovadoras. Entre os métodos físicos destacam-se a adsorção em diferentes matrizes e a filtração por membranas, enquanto processos químicos como coagulação e eletrocoagulação demonstram eficiência variável (Li, 2020). A sua estabilidade molecular e baixa susceptibilidade à biodegradação, limita a eficácia dos tratamentos convencionais. Esta limitação impulsionou o desenvolvimento de processos oxidativos avançados, que promovem a degradação molecular através de espécies reativas. Técnicas como ozonização, sistemas UV combinados com peróxido, e processos eletroquímicos têm sido otimizados para esta finalidade. Além disso, abordagens catalíticas heterogêneas, incluindo sistemas foto-Fenton e fotocatalise, apresentam resultados promissores na mineralização deste contaminante (Athikoh, 2020). Estudos comparativos indicam que a seleção do método ideal depende de fatores como concentração do corante, características da matriz aquosa e custo operacional. Sistemas híbridos, que combinam múltiplas tecnologias, emergem como alternativa para superar as limitações individuais de cada técnica, oferecendo maior eficiência na remoção deste poluente orgânico persistente (Dzinun, 2020).

#### *b. Contaminação por Corantes Dispersos*

O setor têxtil demanda cuidados específicos em razão do elevado consumo hídrico em seus processos produtivos, que incluem operações como limpeza, remoção de impurezas da fibra, tingimento e tratamentos finais. Outro aspecto crítico é a geração significativa de efluentes contendo diversos contaminantes, como agentes dispersantes, substâncias alcalinas, compostos salinos e corantes artificiais, os quais, se descartados

sem tratamento, podem provocar graves danos ao meio ambiente (Senthil Kumar e Grace Pavithra, 2019).

Dentre os diversos corantes utilizados na indústria têxtil, os corantes dispersos destacam-se por sua aplicação principal em fibras de poliéster, embora também sejam empregados em materiais como poliamida, acetato de celulose e fibras acrílicas. Sua baixa solubilidade em água os torna ideais para o tingimento de fibras sintéticas e hidrofóbicas (Ayare et al., 2019). Quimicamente, grande parte desses corantes apresenta grupos azo em sua composição, o que confere características de persistência ambiental e baixa biodegradabilidade. Além disso, devido à sua intensa coloração, mesmo em concentrações reduzidas, esses compostos são facilmente detectáveis nos efluentes industriais. Sua presença em corpos hídricos, como rios e lagos, interfere na passagem de luz e na disponibilidade de oxigênio dissolvido, impactando diretamente o desenvolvimento da flora aquática (Ramamurthy et al., 2024).

Os corantes dispersos são amplamente empregados na indústria têxtil, especialmente no tingimento de poliéster, a fibra sintética mais utilizada globalmente. Diante disso, diversas pesquisas têm explorado métodos eficazes para a remoção desses compostos de efluentes industriais. Um estudo recente avaliou a eficácia da floculação iônica na eliminação do corante disperso azul 56 em águas residuais sintéticas (Melo et al., 2021). Paralelamente, pesquisadores investigaram a adsorção de corantes dispersos laranja 25 e azul 79 utilizando zeólitas derivadas de cenosferas (Markandeya et al., 2021). Outro trabalho destacou a aplicação da eletrocoagulação com eletrodos de ferro e alumínio para o tratamento de efluentes contendo corantes reativos e dispersos, como o vermelho disperso 74 (Houssini et al., 2021). Esses estudos demonstram a contínua busca por técnicas eficientes no tratamento de efluentes têxteis, visando minimizar os impactos ambientais associados a esses poluentes.

A presença de corantes em ecossistemas aquáticos eleva os níveis de turbidez, limitando a penetração da luz solar e prejudicando a atividade fotossintética de organismos como microalgas e macrófitas. Essa interferência desencadeia uma queda nos teores de oxigênio dissolvido, agravando a degradação ambiental e inibindo a capacidade natural de depuração desses ecossistemas. Estima-se que o setor têxtil contribua com aproximadamente 20% da contaminação de recursos hídricos destinados ao consumo humano em escala mundial (Vryzas et al., 2009). Além dos danos ecológicos, esses compostos representam uma ameaça à saúde pública, uma vez que estão vinculados ao desenvolvimento de patologias graves, incluindo neoplasias do trato digestivo (p. ex.,



câncer colorretal) e tumores na bexiga, tais efeitos adversos decorrem de suas propriedades carcinogênicas, mutagênicas e alergênicas (Misal e Gawai, 2018).

É crucial destacar que a redução dos danos ambientais provocados pelos efluentes com corantes está diretamente ligada à aplicação de protocolos eficientes de gerenciamento, descarte e processamento desses poluentes. A incorporação de tecnologias ecológicas no tratamento de efluentes é imprescindível, além de fomentar modelos de produção e consumo responsáveis. Diversas abordagens têm sido empregadas para a eliminação de corantes e outros poluentes de águas residuais, incluindo processos como adsorção/biossorção, entre outros. Dentre as técnicas disponíveis, a adsorção se destaca devido à sua simplicidade operacional, eficácia e viabilidade econômica (Purkait et al., 2019).

#### *c. Contaminação por Fármaco*

A presença de compostos farmacêuticos no meio ambiente tem se destacado como um desafio mundial, sobretudo pelos riscos associados à sua propagação em ecossistemas e organismos. Entre esses poluentes, a rifampicina (RIF) tem sido frequentemente detectada em efluentes, representando uma ameaça significativa aos recursos hídricos e demandando estratégias eficientes para sua eliminação (Helwig et al., 2024).

A RIF é um agente antimicrobiano de ação bactericida, pertencente ao grupo das rifamicinas, com aplicação clínica no tratamento de doenças como tuberculose e hanseníase. Sua estrutura molecular é caracterizada por um sistema naftalênico aromático conjugado a uma porção polipeptídica. Com fórmula química  $C_{43}H_{58}N_4O_{12}$ , esse composto exhibe grupos funcionais críticos para sua eficácia, incluindo uma hidroxila fenólica e radicais hidroxila e acetila. Suas propriedades físico-químicas incluem baixa solubilidade em meio aquoso, contrastando com sua dissolução facilitada em solventes orgânicos como metanol e clorofórmio, um fator determinante no desenvolvimento de suas formas farmacêuticas (Nogueira, 2018).

A rifampicina é um agente antimicrobiano amplamente utilizado no combate a infecções causadas por bactérias Gram-positivas, incluindo casos de meningite tuberculosa, onde demonstra efeitos bactericidas e neuroprotetores. Além disso, esse composto tem aplicação na pecuária como promotor de crescimento animal. Entretanto, devido à sua liberação persistente no meio ambiente por efluentes e à sua elevada



estabilidade química, a RIF tem se acumulado em ecossistemas, configurando-se como um contaminante emergente com escassa regulamentação (Smaali, 2019).

A persistência desse composto em diversos ambientes tem contribuído para o surgimento de bactérias com maior resistência, o que pode resultar em infecções intratáveis e aumentar a mortalidade global. Além disso, os antibióticos afetam negativamente organismos aquáticos, alterando suas funções biológicas, estudos recentes demonstraram anomalias no desenvolvimento e lesões hepáticas em peixes-zebra submetidos a variadas doses de RIF (Rafique et al., 2024). Diante disso, torna-se essencial desenvolver técnicas eficientes para a remoção desse contaminante em efluentes.

Recentemente, estratégias para a eliminação de rifampicina e outros fármacos antimicrobianos de efluentes hídricos têm envolvido técnicas químicas, físicas e biológicas. Contudo, desafios como elevado gasto energético, altos investimentos econômicos e eficiência reduzida em alguns processos restringem seu uso em larga escala. Diante disso, nanomateriais de carbono (CNMs) emergem como uma alternativa promissora para a adsorção desses contaminantes, devido às suas propriedades físico-químicas superiores. Entre as vantagens desse método destacam-se a simplicidade operacional, eficácia elevada, custo acessível e possibilidade de reutilização do material adsorvente (El Messaoudi et al., 2024).

#### 4. CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou que a gestão adequada de efluentes industriais é um desafio complexo, porém indispensável para conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ecológica. A análise dos contaminantes mais críticos como corantes sintéticos, fenólicos e compostos farmacêuticos, reforçaram a magnitude de seus impactos sobre os ecossistemas e a saúde humana, destacando a necessidade de soluções tecnológicas eficientes e acessíveis. Entre as estratégias discutidas, destacam-se os processos de adsorção, oxidação, a biorremediação e as técnicas de membranas, que apresentam potencial para remoção ou degradação de poluentes persistentes. No entanto, a viabilidade de implementação depende de fatores como custo, escalabilidade e integração com políticas públicas. Além disso, a adoção de princípios da economia circular como reuso de água e recuperação de subprodutos surge como uma abordagem promissora para reduzir a geração de resíduos na fonte. Por fim, este trabalho reforça que a transição para indústrias sustentáveis exige colaboração multissetorial, envolvendo



pesquisa científica, inovação tecnológica e regulamentações ambientais rigorosas. Investimentos em educação ambiental e conscientização corporativa também são fundamentais para garantir que as práticas de tratamento não sejam apenas reativas, mas preventivas. O caminho para a sustentabilidade é desafiador, mas os avanços discutidos demonstram que soluções viáveis estão ao alcance quando há compromisso com a responsabilidade socioambiental.

## REFERÊNCIAS

- Anushree, C.; Philip, J. Efficient removal of methylene blue dye using cellulose capped Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids prepared using oxidation-precipitation method. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2019, 567, 193–204.
- Athikoh, N.; Yulianto, E.; Wibowo Kinandana, A.; Sasmita, E.; Husein Sanjani, A.; Wahyu Mustika, R.; Putra Pratama, A.; Farida Amalia, N.; Gunawan, G.; Nur, M. Reduction of Methylene Blue by Using Direct Continuous Ozone. *J. Environ. Earth Sci.* 2020, 10, 46–56.
- Chakraborty, B.; Ray, L.; Basu, S. Biochemical degradation of Methylene Blue using a continuous reactor packed with solid waste by *E. coli* and *Bacillus subtilis* isolated from wetland soil. *Desalin. Water Treat.* 2016, 57, 14077–14082.
- Dzinun, H.; Ichikawa, Y.; Honda, M.; Zhang, Q. Efficient Immobilised TiO<sub>2</sub> in Polyvinylidene fluoride (PVDF) Membrane for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Graphical abstract Keywords. *J. Membr. Sci. Res.* 2020, 6, 188–195.
- Fakayode, S. O. 2005 Impact assessment of industrial effluent on water quality of the receiving Alaro river in Ibadan Nigeria *AJEAM-RAGEE* 10: 1-13.
- Hakeem, K. R., et al. (2017). *Plant, Soil and Microbes: Volume 2: Mechanisms and Molecular Interactions*. Springer.
- Hill, C. A. S. (2006). *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Wiley.
- Kosswig, K. (2002). *Surfactants*. Wiley-VCH.
- Li, H.; Liu, L.; Cui, J.; Cui, J.; Wang, F.; Zhang, F. High-efficiency adsorption and regeneration of methylene blue and aniline onto activated carbon from waste edible fungus residue and its possible mechanism. *RSC Adv.* 2020, 10, 14262–14273



- Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., & Maham, M. (2020). **Green synthesis of graphene from bioresources and its application for heavy metals removal.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry
- Sangodoyin, A.Y. 1991 Groundwater and Surface Water Pollution by Open Refuse Dump in Ibadan, Nigeria. Journal of Discovery and Innovations, 3 (1): 24-31.
- Seyed Dorraji, M. S., et al. (2018). Eco-toxicological effects of methylene blue and malachite green on aquatic environment.
- Salimi, A.; Roosta, A. Experimental solubility and thermodynamic aspects of methylene blue in different solvents. Thermochim. Acta 2019, 675, 134–139.
- Silverman, R. B., & Holladay, M. W. (2018). The Organic Chemistry of Drug Design and Drug Action. Elsevier.
- Sweetman, S. C. (Ed.). (2009). Martindale: The Complete Drug Reference. Silverman, R. B., & Holladay, M. W. (2018). The Organic Chemistry of Drug Design and Drug Action. Elsevier.
- Vryzas Z, Vassilioub G, Alexoudisb C, and Papadopoulou-Mourkidoua E. 2009. Spatial and temporal distribution of pesticide residues in surface waters in Northeastern Greece. Water Res. 2009; 43(1): 1–10.
- Wang, Z. (2018). Phenol formaldehyde resins. In A. Pizzi (Ed.), Wood adhesives (pp. 161-184). Elsevier.
- Zhang, L., Zhang, F., Yang, S., Yang, X., & Wang, S. (2020). Sustainable Approach for the Green Reduction of Graphene Oxide and Its Excellent Adsorption towards Heavy Metals. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,





Viviane Corrêa Santos  
(Organizadora)

# CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Pesquisa, Inovação e Prática

VOLUME 1

ISBN:978-85-9535-334-3

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-334-3

 editora  
**itacaiúna**