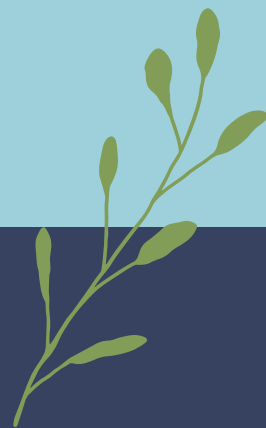


Do descarte AO RECURSO



Como Transformar CO₂ e Poluentes em Energia Limpa?

A poluição das águas geradas na extração de petróleo é um desafio ambiental.



ÁGUA DE PETRÓLEO

Durante a exploração e o refino do petróleo, é gerada uma água residual conhecida como "água de petróleo", que contém resíduos tóxicos.

Essa água não pode ser descartada sem tratamento, pois seus contaminantes podem causar sérios danos ao meio ambiente. É importante ressaltar que nem todas as cidades têm os meios necessários para tratar essa água, fazendo com que a contaminação da água possa chegar até a população.



Para abordar esse problema, a Prof. Dra. Juliana Ferreira de Brito e colaboradores da Universidade Estadual Paulista (Unesp) desenvolveram um reator inovador durante sua Tese de Doutorado. Esse reator é capaz de remover compostos tóxicos das águas residuais enquanto converte o dióxido de carbono (CO₂) em combustíveis, como metanol e etanol.

Texto de Divulgação Científica

Instituto de Química de Araraquara, UNESP

ELABORADORES

Letícia Maciel de Souza
Vinicius Rodrigues Calori
Ramiro Igor Soares dos Santos
Luana Caroline Tonhetti Maester
Lívia Talarico Perini

ORIENTAÇÃO

Fernanda Zanolli Freitas
Amadeu Moura Bego

REVISÃO TÉCNICA

Giovanna Craveiro Marineli
Isabela Fernandes Ierick
Leonardo Lima e Silva
Marina Medina da Silva
Juliana Ferreira de Brito

Araraquara
2025



Esta obra é licenciada sob uma licença **Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilhual (CC BY-NC-SA 4.0)**. Esta licença permite a cópia e redistribuição do material, em qualquer suporte ou formato, bem como sua tradução, adaptação e outras modificações, sem fins comerciais, desde que o crédito seja atribuído ao autor, que as alterações, se houver, sejam informadas e que as novas criações sejam licenciadas sob esta mesma licença. Os termos da licença são detalhados em <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.pt>.

Revisão Técnica

Giovanna Craveiro Marineli

Isabela Fernandes Ierick

Leonardo Lima e Silva

Marina Medina da Silva

Juliana Ferreira de Brito

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

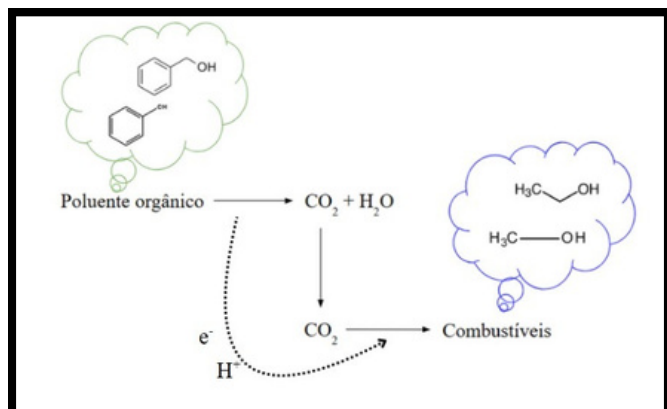
Do descarte ao reuso: como transformar CO₂ e poluentes em energia limpa? [recurso eletrônico] / Letícia Maciel de Souza ... [et al.] ; organizado por Fernanda Zanolli Freitas e Amadeu Moura Bego. — Araraquara : Instituto de Química, 2025.
9 p. : il. color., fotos color. ; PDF.

1. Divulgação científica 2. Água Poluição por petróleo 3. Reação de oxidação-redução 4. Contaminação 5. Impacto ambiental Avaliação

Débora Marroco Ninin (bibliotecária responsável) - CRB 8/9343

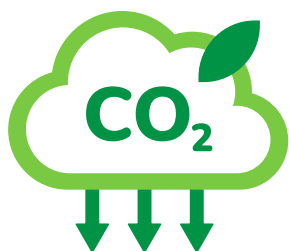
COMO QUE ISSO ACONTECE ?

O reator estudado, pequeno como um cubo mágico, utiliza eletricidade para promover reações químicas, em um processo chamado **fotoeletrocatálise**, no qual transforma dióxido de carbono (CO_2) em combustíveis e remove poluentes da água de petróleo, como mostra a imagem abaixo.



fotoeletrocatálise é uma técnica que combina a ação de luz (foto) e eletricidade (eletro) para acelerar reações químicas (catálise). Ela utiliza materiais que, ao serem iluminados, geram cargas elétricas que promovem reações.

Esse tipo de resíduo contém substâncias, como o álcool benzílico, que por serem nocivas ao meio ambiente, precisam ser removidas antes do descarte. No reator, a luz UV ativa um eletrodo especial, que funciona como uma “chave” para iniciar as reações químicas.



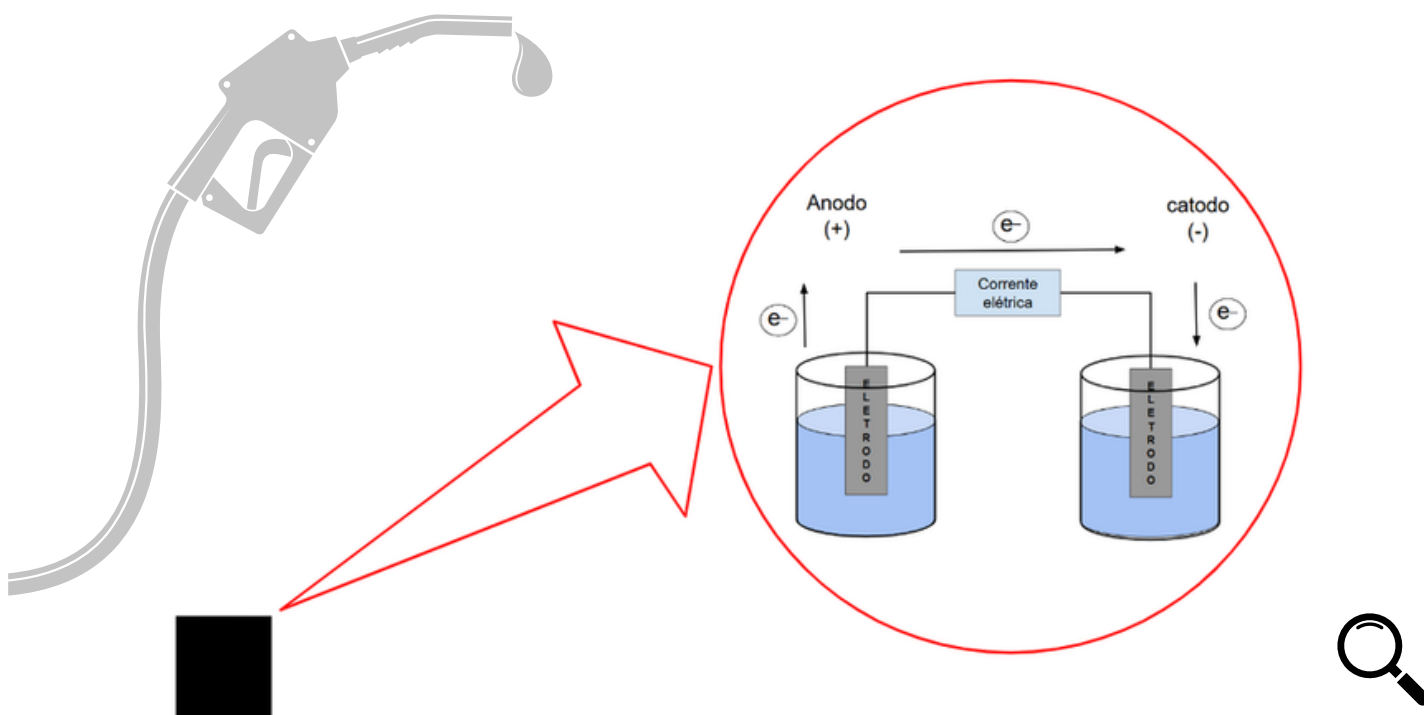
Ele energiza catalisadores que ajudam a quebrar moléculas de poluentes liberando elétrons e íons H^+ para manter as reações acontecendo. Os elétrons são direcionados ao cátodo para reduzir o CO_2 em metanol e etanol, enquanto os H^+ auxiliam essa reação, aumentando a eficiência.

eletrodo é como uma “ponte” por onde a eletricidade se move na reação química. Dentro de uma solução, os eletrodos ajudam a mover cargas elétricas como se fossem portas para os elétrons entrarem (cátodo) e saírem (ânodo).

Vamos lembrar o que é o processo de oxidação:

A oxidação acontece quando um átomo, molécula ou íon perde elétrons, aumentando o número de oxidação. Isso ocorre em conjunto com uma reação de redução, na qual outra espécie ganha elétrons. Vale lembrar também que aquele que oxida é chamado de agente redutor e quem reduz é o agente oxidante.

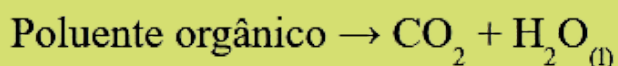
COMO QUE ISSO ACONTECE ?



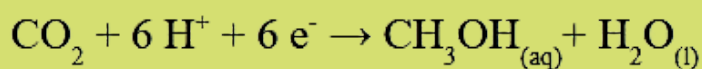
Célula eletroquímica: uma célula eletroquímica é um dispositivo que utiliza energia elétrica para forçar uma reação não espontânea. Nessa célula, a energia química é convertida em energia elétrica por meio de reações de oxidação e redução.

É composta por dois eletrodos, o **ânodo**, onde ocorre a oxidação e o **cátodo**, onde ocorre a redução, ambos imersos em uma solução eletrolítica (solução em que há íons, que transportam carga). Como se trata de uma eletrólise, lembre-se de que os polos são invertidos, ou seja, o cátodo é o polo negativo e o ânodo, o positivo.

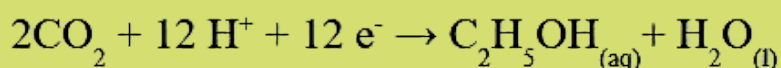
Esse processo ocorre em duas etapas: a oxidação do poluente orgânico no ânodo, o convertendo em CO_2 e água, e a utilização dos elétrons e íons H^+ gerados para converter o CO_2 em combustíveis no cátodo. Dessa forma, o reator trata a água contaminada e produz etanol e metanol de forma sustentável.



reação de oxidação



reação de redução



reação de redução

COMO QUE ISSO ACONTECE ?

Como podemos ver nas equações químicas anteriores, o poluente orgânico é convertido em CO_2 e água no cátodo e todos os elétrons e H^+ que também são gerados no catodo devido a reação de oxidação do dióxido de carbono são direcionados ao ânodo para que lá eles sejam usados para que a redução ocorra, ou seja, eles fornecerão a energia necessária para que o CO_2 seja convertido nos combustíveis de interesse do trabalho.

Os principais poluentes encontrados na água de petróleo incluem:

1. **Hidrocarbonetos**, como metano, etano, benzeno, tolueno, xilenos e naftalenos. Os seus impactos podem ser tóxicos para organismos aquáticos e causar contaminação do solo e da água.
2. **Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)**, como álcool benzílico, fenol e ácidos orgânicos. Eles contribuem para a poluição do ar e têm efeitos tóxicos na água.

Os resultados mostraram que a utilização de eletrodos diferenciados melhorou a produção de combustíveis em relação a outras pesquisas já existentes. Assim, o reator mostrou potencial para tratamento de efluentes e geração de energia sustentável.

TRANSFORMANDO POLUIÇÃO EM COMBUSTÍVEL

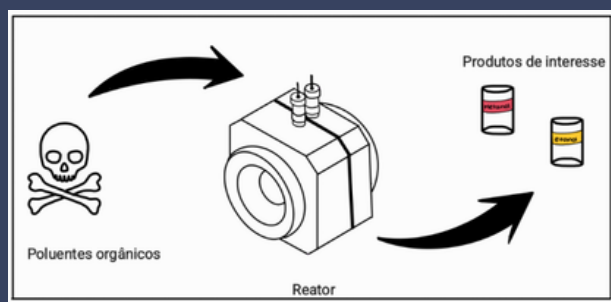
A mágica acontece por meio da técnica chamada **fotoeletrocatalise**. Dentro do reator, o CO_2 é transformado em **compostos menos prejudiciais**, como o metanol e o etanol.

Essa transformação ocorre ao mesmo tempo que a degradação dos poluentes orgânicos presentes na água, no compartimento **fotoanódico**.

O que torna essa abordagem ainda mais interessante é que tanto a **energia elétrica** quanto a **luz** são utilizadas para **impulsionar** o **processo**, permitindo transformar poluentes em recursos valiosos enquanto também faz a limpeza da água.

TRANSFORMANDO POLUIÇÃO EM COMBUSTÍVEL

TUDO ACONTECE NO MESMO REATOR



Um dos componentes mais interessantes do reator é o fotoânodo, que é feito de **nanotubos** com materiais especiais. Esses nanotubos têm propriedades únicas que os tornam extremamente eficientes na oxidação de poluentes.

Nos testes, o reator conseguiu remover até 68% das substâncias tóxicas, além de produzir combustíveis que podem ser usados de diversas maneiras. Isso é importante porque os combustíveis fósseis estão cada vez mais escassos. Outra vantagem desses nanotubos é sua alta resistência à **fotocorrosão**, o que significa que eles não se desgastam facilmente quando expostos à luz, tornando o processo ainda mais eficiente.

Os **nanotubos** são tubos muito pequenos feitos de átomos de carbono. Eles são fortes e conduzem eletricidade, por isso são usados em tecnologias que ajudam a realizar reações químicas mais rápidas.

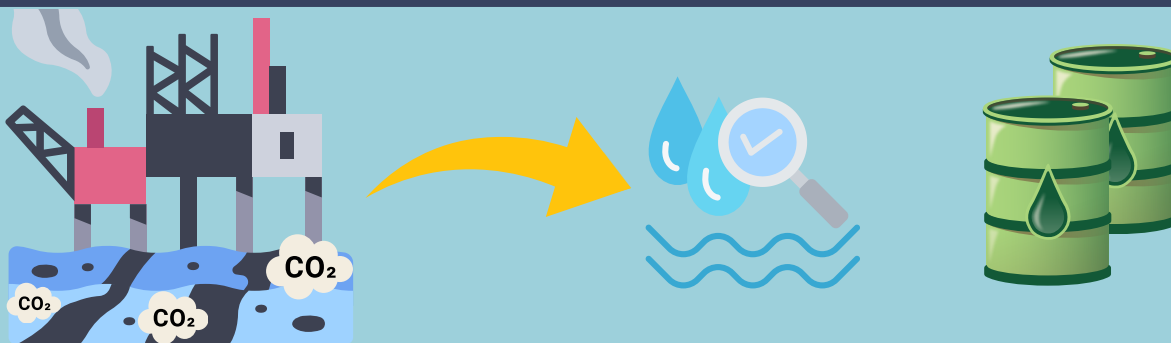
O compartimento fotoanódico é a parte de um reator onde a luz ajuda a iniciar reações químicas. Um material especial chamado fotoanodo absorve a luz e gera elétrons, que podem quebrar poluentes ou transformar substâncias como o CO_2 em combustíveis.

Fotocorrosão é quando um material se desgasta ou enfraquece por causa da luz. Em processos que usam luz para reações químicas, como a fotoeletrocatalise, é importante evitar a fotocorrosão para que o material não estrague com o tempo.

Os resultados obtidos com esse reator são **bastante promissores**. Ele não só melhora a eficiência do **tratamento de águas** residuais, mas também ajuda a **reduzir** os níveis de **CO_2** gerando produtos úteis. Isso pode favorecer a chamada economia circular, na qual um **problema** (a poluição) se transforma em uma **solução prática** (a geração de combustíveis).

Essa tecnologia tem grande potencial para o **tratamento de resíduos de indústrias**, já que diminui a quantidade de poluentes e produz combustíveis que podem ser usados em várias aplicações. Isso mostra como a **ciência** está encontrando **soluções criativas e eficientes** para os **problemas ambientais atuais**.

INOVAÇÃO NA CONVERSÃO DE CO₂ E POLUENTES



A pesquisa revelou que é possível converter CO₂ em combustíveis, como metanol e etanol, enquanto simultaneamente remove poluentes da água, como o álcool benzílico.



Estudos futuros podem focar no aperfeiçoamento de materiais, como os eletrodos, para aumentar a eficiência do processo, reduzir o consumo de energia e até adaptar a técnica para a remoção de outros poluentes perigosos. Apesar dos avanços, ainda há questões importantes a serem resolvidas.

É fundamental ressaltar que essa pesquisa foi realizada em ambiente laboratorial, o que exige uma análise cuidadosa sobre a viabilidade em escala industrial. Essa transição envolve desafios relacionados à eficiência do processo, custos de investimento e o impacto econômico, que precisam ser considerados para uma implementação prática e sustentável.



Estes resultados podem exercer impacto significativo no desenvolvimento de tecnologias limpas, influenciando políticas públicas voltadas para a redução de CO₂ e o tratamento de águas residuais.



REFERÊNCIAS

BRITO, J. F. de *et al.* Combination of photoelectrocatalysis and ozonation as a good strategy for organics oxidation and decreased toxicity in oil-produced water.

Journal of The Electrochemical Society, v. 166, n. 5, p. H3231, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0331905jes/pdf>.

BRITO, J. F. de *et al.* Turning carbon dioxide into fuel concomitantly to the photoanode-driven process of organic pollutant degradation by photoelectrocatalysis. **Electrochimica acta**, v. 306, p. 277-284, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.134>.

MEDINA, Marina *et al.* The substrate morphology effect for sulfur-rich amorphous molybdenum sulfide for electrochemical hydrogen evolution reaction. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 169, n. 2, p. 026519, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac5067>.

SPUTNIK BRASIL. Brasileira desenvolve método para produzir etanol a partir de água de petróleo. **Notícia Brasil**, 31 jan. 2020. Disponível em: <https://noticiabrasil.net.br/20200131/brasileira-desenvolve-metodo-para-produzir-etanol-a-partir-de-agua-de-petroleo-15081878.html>.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Grupo de Eletroanalítica de Araraquara (GEAr), liderado pela Profa. Dr. Juliana Ferreira de Brito, por compartilhar conhecimento e experiências nas áreas de Eletroanalítica e Química Ambiental. Nosso reconhecimento aos pesquisadores João Ângelo Lima Perini, Siglinda Perathoner e Maria Valnice Boldrin Zanoni pelo estudo inspirador sobre a reutilização do CO₂. Também agradecemos aos mestrandos Giovanna Craveiro Marineli, Isabela Fernandes Ierick e Leonardo Lima e Silva, e à pesquisadora Marina Medina da Silva, pela valiosa revisão técnica. E, por fim, aos orientadores Profa. Dr. Fernanda Zanolli Freitas e Prof. Dr. Amadeu Moura Bego, pela orientação e todo o apoio que nos permitiu a elaboração e publicação deste material.