

XXX Workshop do PRH44.1 em Petróleo, Gás e Energias Renováveis
14 a 16 de janeiro de 2025
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás - NUPEG



LIVRO DE RESUMOS

Natal
2025

Sumário

Imobilização de Bactérias – Análise Bibliométrica do Potencial para a Biodegradação de Petróleo e Derivados	3
Modificação de Níquel para Produção de Hidrogênio Verde e Valorização de Lignina Através de Processo Híbrido de eletrólise	5
Avaliação do Desempenho da Ozonização para Degradação de Fenol em Água.....	7
Estruturas Metal-Orgânicas à Base de Cobalto para Aplicações em Fluidos de Perfuração Base Água: Caracterização e Perspectivas Futuras.....	9
Valorização de Resíduos Lignocelulósicos do Coco e da Cana-de-Açúcar na Produção de Triacetato de Celulose	11
Equilíbrio Líquido-Vapor do Sistema Óleo de Eucalipto da Pirólise Diluído em Etanol.....	13
Análise de Microsistema Contínuo na Captura de CO ₂ com Solução de MEA	15
Síntese de Aerogel de Grafeno a Partir da Biomassa da Calotropis Procera: Desafios e Aplicações em Separação de Misturas Água-Óleo.....	17
Um Sistema de Visão Computacional Baseado em Redes Neurais Convolucionais para Tomada de Decisões em um Protótipo Sistema Flexível de Manufatura	19
Implementação de Protocolo de Transmissão de Dados para Análise de Falhas em Sistemas Mecânicos em Aero geradores	21
Avaliação de um Sistema para a Medição da Energia Consumida em Testes de Esclerometria Pendular	23
Simulação Computacional dos Perfis Aerodinâmicos Naca com Diferentes Simetrias e Aplicação em Aero geradores	25
O Impacto do Uso de Nanopartículas na Formação de Tribofilmes: Uma Visão Sobre a Ótica da Espectroscopia Raman com Interferometria	27
Desgaste Triboquímico de Agulhas dos Bicos Injetores em Motores a Diesel Operando com Biodiesel Aditivado com Nanopartículas de Óxido de Cobre	29
Simulação Numérica do Potencial Eólico Offshore no Rio Grande do Norte	31
Desenvolvimento e Montagem de um Sistema de Transmissão de Potência para um Veículo Leve Híbrido.....	33
Cinética de Adsorção de Fenol e Fenantreno por Argilas Organofílicas.....	35
Desenvolvimento de Metodologias para o Pré-Tratamento da Água Produzida de Petróleo: Coagulação e Floculação como Etapas Iniciais do Processo.....	37
Síntese de Diesel Verde a Partir da Desoxigenação de Óleos Vegetais	39
Síntese de Lignina Aminada para Absorção De CO ₂	41
Estudo de Degradação Térmica de Microalga In-Natura e Pós-Extração de Óleo	43
Avaliação do Uso Óleo da Microalga para Produção de SAF	45
Integração de MEA na Captura de CO ₂ para Mineralização de Carbono	47
Adsorção de Cromo em Água Produzida Utilizando Biocarvão Dopado com Ferro	49
Densidade de Soluções Aquosas Eletrolíticas em Altas Pressões Via Simulação Molecular.....	51

Imobilização de Bactérias – Análise Bibliométrica do Potencial para a Biodegradação de Petróleo e Derivados
Francisco B. F. Freitas; Nathalia S. Rios; Everaldo S. Santos*
Laboratório de Engenharia Bioquímica – Departamento de Engenharia Química
**brunoferreirafrei@gmail.com*

Introdução

A poluição ambiental decorrente de vazamentos, derramamentos e interrupções em oleodutos configura-se como uma problemática ambiental de elevada complexidade, com impactos significativos para comunidades, ambientalistas e gestores governamentais [1]. Os derramamentos de petróleo acarretam danos extensivos aos ecossistemas, gerando alterações químicas, físicas e biológicas no ambiente. Diversas abordagens têm sido exploradas para a remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, abrangendo métodos biológicos, físicos, químicos, fitorremediação, bem como combinações híbridas dessas estratégias. Entre as alternativas disponíveis, a biorremediação destaca-se como uma técnica ecologicamente sustentável, amplamente utilizada para a recuperação de solos contaminados [2]. Entretanto, sua eficácia pode ser limitada por fatores adversos, como a toxicidade intrínseca do petróleo, condições ambientais inadequadas, insuficiência de nutrientes e a competição com microbiota indígena [2, 3]. Para mitigar essas limitações, um avanço promissor é a utilização de microrganismos imobilizados em matrizes específicas, uma estratégia que combina proteção estrutural e otimização da atividade metabólica microbiana para a degradação de hidrocarbonetos [4]. Nesse contexto, a aplicação de métodos estatísticos aliados a análises bibliométricas constitui uma ferramenta estratégica para a identificação de tendências, mapeamento de dinâmicas de desenvolvimento científico e consolidação de dados relacionados à temática [5]. O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica sistemática sobre o estado da arte referente ao uso de microrganismos imobilizados na biodegradação de petróleo e seus derivados, com vistas a compreender o potencial dessa técnica no enfrentamento de desafios ambientais associados à contaminação por hidrocarbonetos.

Metodologia

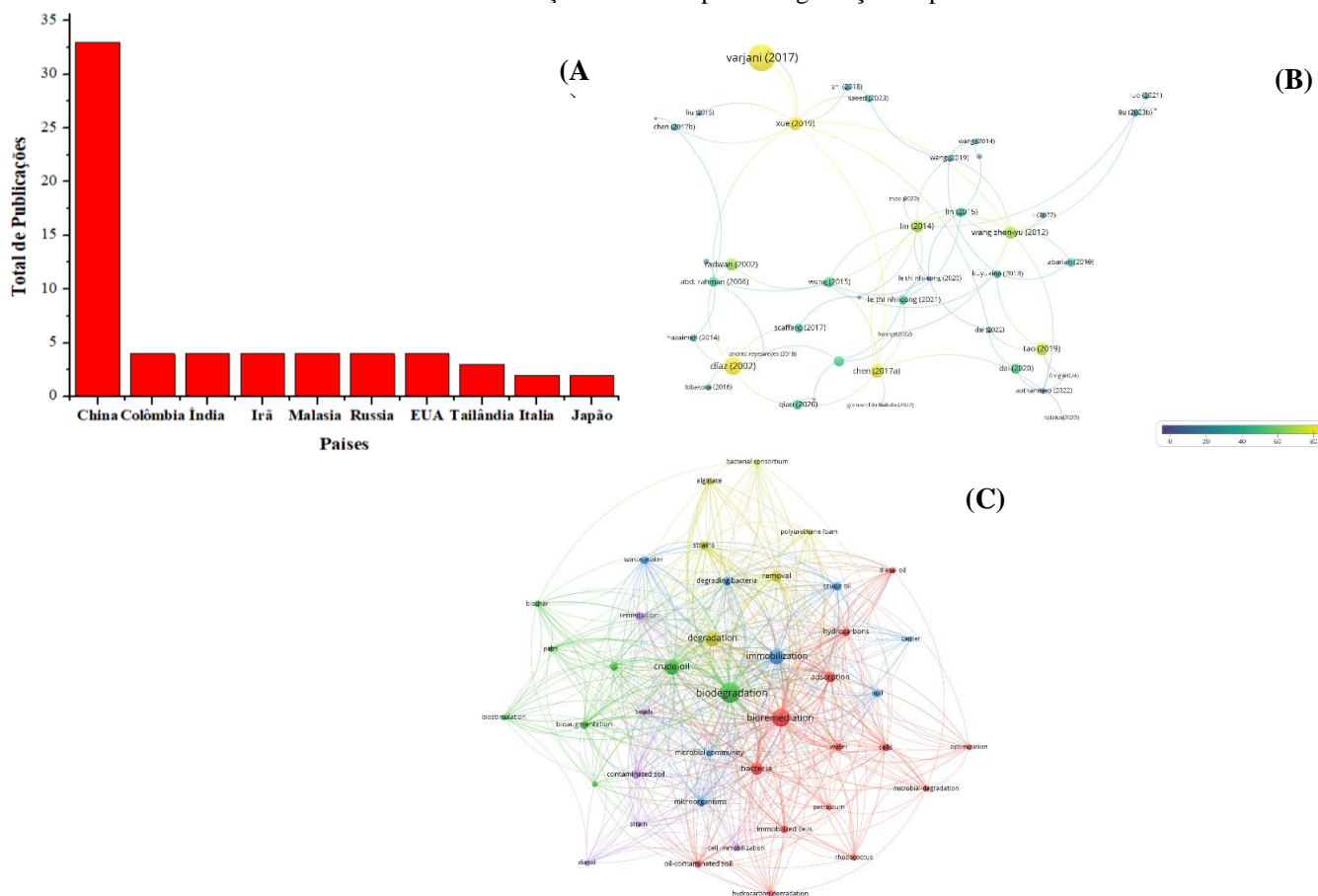
Foi realizada uma revisão bibliométrica utilizando o banco de dados *Web of Science*® (WOS), durante o mês de janeiro de 2025. Os campos incluídos na busca foram título, resumo e palavras-chave, com a aplicação de filtros para “artigos” como tipo de documento e independentemente do idioma. As buscas com as palavras-chave “*Immobilized*” “*bacteria*” “*biodegradation*” “*crude oil*” foram realizadas sem restrição de tempo. Foram coletadas informações sobre as publicações com base na força do link estabelecido pelo software *VOSviewer* versão 1.6.20, foi analisado também informações sobre países que mais publicam na área, assim como as publicações mais citadas e a quantidade de ocorrências das palavras-chaves.

Resultados e Discussão

Foram encontrados um total de 69 publicações utilizando as palavras-chaves descritas na metodologia. Os resultados da busca realizadas no WOS, para o ranking dos 10 países que mais publicaram artigos dentro do tema proposto, está descrito na Figura 1.a. Observa-se que a China domina a quantidade de publicações (sendo 33, 47,83%) referentes ao tema. Essa quantidade alta de artigos publicados pode ser explicada pela rede de colaborações dos pesquisadores chineses com pesquisadores de outros países. Outro ponto que chama atenção é que em nenhum momento do ranking o Brasil aparece com alguma publicação na área, o que se torna um fator crucial para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema, tendo em vista que o Brasil é um dos maiores produtores de petróleo do mundo e que acidentes envolvendo derramamento de petróleo aqui no Brasil já geraram diversos problemas econômicos. A análise das citações e coocorrência de palavras-chave esta apresentada nas figuras 1.b e 1.c respectivamente. Foram consideradas no mínimo 10 citações de artigos e 5 ocorrências de todas as palavras-chave. O tamanho do nó (círculo) representa o número de citações dos autores e ocorrências da palavra-chave, com um nó maior indicando um número maior de citações e ocorrências. Observa-se, na figura 1.b que Varjani (2017) apresentou uma maior quantidade de citações (317), o artigo em questão traz informações gerais acerca da utilização de bactérias para a degradação de petróleo e principalmente quais fatores afetam o seu desempenho, por se tratar de um artigo mais geral seu número alto de citações pode levar a considere-lo como um artigo chave para as pesquisas no tema, em sequência vem o artigo de Díaz (2002) (146), o autor estuda como diferentes concentrações de salinidade podem afetar o desenvolvimento de um consorcio bacteriano extremamente halotolerante imobilizado em fibras de polipropileno e como esse fator contribui para o aumento no percentual de degradação do petróleo. Ao analisarmos a figura 1.c, observamos que as palavras “*Biodegradation*”, “*Bioremediation*” e “*Immobilization*” apresentam as maiores ocorrências, 51, 40, 29 ocorrências

respectivamente, com isso confirmamos que a maioria dos artigos é focada na biodegradação e na imobilização de células. Conforme mostrado na Fig. 3, cinco trajetórias de estudo distintas puderam ser discernidas, representadas por clusters de azul, verde, vermelho, roxo e amarelo. O cluster amarelo apresenta algumas palavras-chaves, como “alginate”, “bacterial consortium” e “polyurethane foam”, podem representar os materiais utilizados para a imobilização de bactérias. O cluster verde, representado em sua maioria pelas palavras-chaves “biodegradation”, “bioaugmentation”, “biostimulation” e “biosurfactant”, podem representar diferentes técnicas utilizadas para o favorecimento da degradação do petróleo através das bactérias. O cluster roxo, apresenta as palavras-chaves “contaminated soil” e “breads” como as que apresentam maiores quantidade de ocorrências, podem representar a utilização de células imobilizadas para a degradação de petróleo no solo. As palavras-chaves “Immobilization”, “Wastewater”, “Soil” e “crude oil” estão representando o cluster azul, podendo ser relacionados a utilização da imobilização de células para a degradação de diferentes contaminantes, como águas residuais, solo etc. Por fim, o cluster vermelho, apresenta a maior quantidade de palavras-chaves, como os termos “bioremediation”, “adsorption”, “bacteria”, apresentam de maneira mais geral a utilização da imobilização de células na biodegradação de petróleo e seus derivados.

Figura 1. Total de publicação por países (A) e mapas de rede para citação (B) e coocorrência de palavras-chave (C) no WOS referentes a imobilização de células para a degradação de petróleo.



Conclusões

A partir dos dados, é possível observar que a pesquisa referente a imobilização de células e sua utilização para a degradação de petróleo é de extrema importância, sendo uma técnica promissora, apresentando resultados positivos. É possível concluir que vários trabalhos de diferentes países estudam essa técnica e cada vez mais a aprimoram. Ocorre a necessidade de estudos mais avançados no Brasil e que fortaleçam a utilização da técnica.

Referências Bibliográficas

- [1] IKUESAN, F. A. Journal of Scientific Research and Reports, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 1–9, 2017. DOI: 10.9734/JSRR/2017/29151. Disponível em: <https://journaljsrr.com/index.php/JSRR/article/view/708>. Acesso em: 11 jan. 2025.
- [2] ZHANG, B.; ZHANG, L.; ZHANG, X. RSC Advances, v. 9, n. 60, p. 35304–35311, 28 out. 2019.
- [3] KONG, L. et al. Journal of Hazardous Materials, v. 343, p. 276–284, 5 fev. 2018.
- [4] CHEN, B.; YUAN, M.; QIAN, L. Journal of Soils and Sediments, v. 12, n. 9, p. 1350–1359, 3 out. 2012.
- [5] DE SOUZA, W. F. C. et al. Food Research International, v. 155, p. 111061, 1 may 2022.

Modificação de Níquel para Produção de Hidrogênio Verde e Valorização de Lignina Através de Processo Híbrido de eletrólise

Herbet L. Oliveira*; Carlos A. Martínez-Huitle; Elisama V. dos Santos

Laboratório de Eletroquímica Ambiental e Aplicada / Departamento de Engenharia Química

****herbet.lima.097@ufrn.edu.br***

Introdução

A produção de hidrogênio verde por eletrólise da água tem se destacado como uma alternativa promissora para mitigar os impactos ambientais associados às fontes fósseis de energia. Nesse contexto, o desenvolvimento de métodos eficientes e econômicos para a fabricação de eletrodos catalisadores é fundamental. O níquel, devido à sua abundância, estabilidade em meios alcalinos e propriedades catalíticas, é amplamente utilizado em processos de evolução de hidrogênio (HER). No entanto, sua eficiência pode ser aprimorada por meio de modificações estruturais e químicas, que aumentam a área ativa e a interação com o eletrólito [1].

O método dinâmico de bolha de hidrogênio (MDBH), aplicado na eletrodeposição de níquel, surge como uma abordagem inovadora para modificar superfícies metálicas. Este método utiliza a geração de bolhas de hidrogênio durante o processo de eletrodeposição, o que resulta em estruturas porosas e altamente ativas. Dessa forma, essa técnica não apenas aumenta a área superficial efetiva do eletrodo, mas também melhora a distribuição dos sítios catalíticos, contribuindo para a eficiência do processo [2].

Neste trabalho, propõe-se a modificação de placas planas de níquel por meio do método dinâmico de bolha de hidrogênio, utilizando uma solução eletrolítica contendo níquel. O sistema será integrado a uma célula eletroquímica dividida do tipo AEM (membrana de troca aniônica), na qual a placa de níquel com ou sem modificação será aplicada no cátodo para a evolução do hidrogênio verde, enquanto no ânodo ocorre a oxidação de lignina, um composto abundante e subutilizado, para a geração de produtos de maior valor agregado. Esta abordagem combina a produção sustentável de hidrogênio com o aproveitamento de resíduos biomássicos, destacando-se como uma estratégia integrada e inovadora para o avanço em processos de energia limpa e economia circular.

Metodologia

Placas de níquel (1 cm²) foram modificadas por eletrodeposição utilizando o método dinâmico de bolha de hidrogênio, em uma solução de 0,1 mol/L de NiCl₂·6H₂O e 2 mol/L de NH₄Cl, com corrente de 2,0 A aplicada por 2 minutos. Após a modificação, os eletrodos foram utilizados em uma célula eletroquímica dividida do tipo AEM (membrana de troca aniônica), com densidades de corrente de 30, 60 e 100 mA cm⁻², operando em fluxo com recirculação contínua das soluções. O compartimento anódico continha 500 ppm de lignina em 0,5 mol/L de NaOH, enquanto o compartimento catódico utilizava 0,5 mol/L de NaOH, ambos mantidos em temperatura e pressão ambiente. O desempenho foi avaliado considerando a eficiência da evolução de hidrogênio no catodo (níquel modificado) e a oxidação da lignina no anodo (BDD/Si).

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos destacam as vantagens do níquel modificado em relação ao níquel sem modificação para a evolução de hidrogênio. Conforme mostrado no gráfico 1a, o níquel modificado apresentou um potencial significativamente menor para a evolução de hidrogênio, indicando maior eficiência eletrocatalítica. No gráfico 1b, o espectro de impedância eletroquímica revela que o níquel modificado possui uma resistência de transferência de carga menor, facilitando o transporte eletrônico durante as reações. Além disso, a análise da corrente capacitiva no gráfico 1c evidencia que o níquel modificado apresentou valores mais elevados, sugerindo uma área eletroativa consideravelmente maior. Esses fatores combinados resultaram em uma maior produção de hidrogênio verde, conforme

demonstrado no gráfico 1d, com volumes de 107, 213 e 280 mL de hidrogênio gerados em 5 horas para densidades de corrente de 30, 60 e 100 mA cm⁻², respectivamente.

Figura 1. Caracterizações eletroquímicas das placas de níquel, com e sem modificação: (a) Voltamogramas lineares para a evolução de hidrogênio, (b) Espectros de impedância eletroquímica, (c) Voltametria cíclica para análise da corrente capacitiva, e (d) Volume de hidrogênio produzido ao longo do tempo durante a oxidação da lignina, utilizando a placa de níquel modificada em diferentes densidades de corrente.

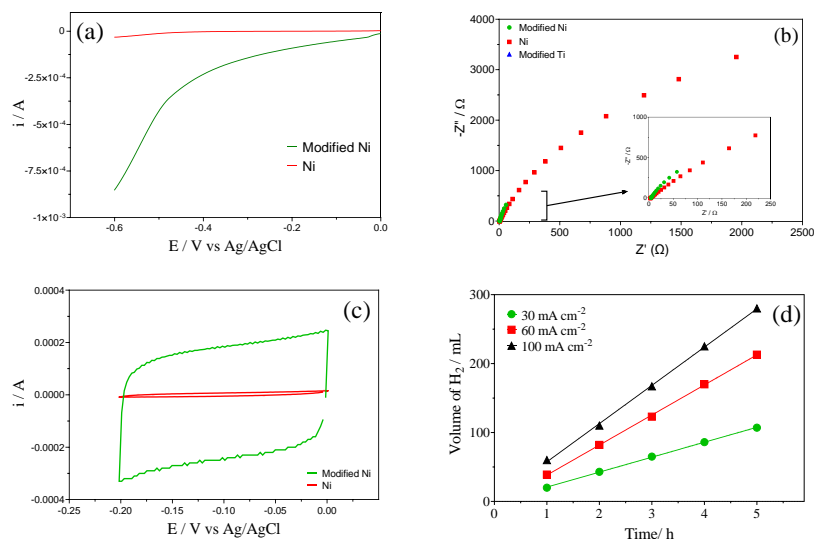
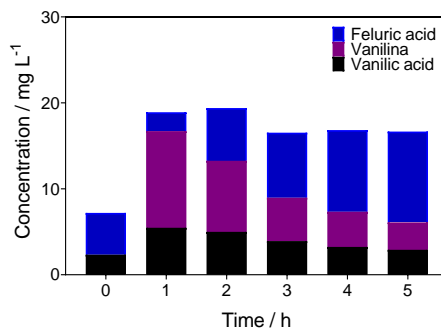


Figura 2. Produção de compostos aromáticos pela eletro-oxidação de 500 ppm de lignina em 0,5 mol/L de NaOH, utilizando BDD/Si como ânodo e placa de níquel modificada pelo método dinâmico de bolha de hidrogênio como cátodo sob densidade de corrente de 100 mA cm⁻².



Na Figura 2, é apresentada a evolução das concentrações de compostos aromáticos durante a eletro-oxidação de lignina ao longo de cinco horas. Na primeira hora, as maiores concentrações foram observadas para ácido vanílico (5,469 mg/L) e vanilina (11,25 mg/L), sugerindo sua formação como intermediários principais no início do processo. Entretanto, com o progresso da reação, essas concentrações diminuiriam gradualmente, enquanto a concentração de ácido ferúlico aumentou significativamente, alcançando 10,565 mg/L na quinta hora.

Conclusões

O MDBH demonstrou-se eficaz na modificação de placas de níquel, melhorando sua eficiência na evolução de hidrogênio. Os eletrodos modificados permitiram a produção de volumes significativos de hidrogênio verde. Além disso, foi possível obter compostos aromáticos valiosos, como vanilina, ácido vanílico e ácido ferúlico, concomitante à produção de hidrogênio empregando ânodo de BDD/Si. Esses resultados destacam o potencial dessa abordagem para tecnologias sustentáveis integrando energia renovável e valorização de biomassa.

Referências Bibliográficas

- [1] Doan, H.; Kendrick, I.; Blanchard, R.; Jia, Q.; Knecht, E.; Freeman, A.; Jankins, T.; Bates, M.K.; Mukerjee, S. Functionalized Embedded Monometallic Nickel Catalysts for Enhanced Hydrogen Evolution: Performance and Stability. *J. Electrochem. Soc.*, 168, 084501, 2021.
- [2] Qiu, H.; Tang, T.; Asif, M.; Huang, X.; Hou, Y. 3D porous Cu current collectors derived by hydrogen bubble dynamic template for enhanced Li metal anode performance. *Adv. Funct. Mater.*, 29(19), 1808468, 2019.

Avaliação do Desempenho da Ozonização para Degradação de Fenol em Água
*Joyce A. B. Souza**; *Avylla A. B. Souza*; *Amilcar Machulek Junior*; *Oswaldo Chivone-Filho*
Laboratório de Fotoquímica e Equilíbrio de fases – Departamento de Engenharia Química
**joyceabsouza@gmail.com*

Introdução

A água produzida de petróleo (APP) é o efluente gerado nas indústrias petrolíferas e que, quando descartada de forma inadequada, pode ocasionar a inserção de metais pesados, óleos e graxas, além de inúmeros contaminantes orgânicos na água, contaminando-a [1]. O fenol é um exemplo destes compostos orgânicos presentes e que possui elevada relevância de estudo, tendo em vista sua elevada incidência nos efluentes petrolíferos, sua toxicidade desde pequenas concentrações e por ser solúvel, bioacumulativo e recalcitrante [2]. Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são aplicados para o tratamento de águas contaminadas com compostos orgânicos recalcitrantes por meio da geração de radicais reativos [1]. A ozonização também se trata de um POA, que utiliza o ozônio como espécie oxidante para geração de radicais hidroxilas ($\bullet\text{OH}$). Ela possui a capacidade de degradar poluentes, como o fenol. Uma intensificação deste processo é o uso de irradiação e fotocatalisadores [3]. Diante da problemática, este trabalho possui como objetivo avaliar a degradação de fenol em soluções aquosas por meio da utilização da técnica de ozonização, utilizando como comparação um processo Fenton e foto-Fenton, usando como fonte de ferro resíduo de mineração de ametista.

Metodologia

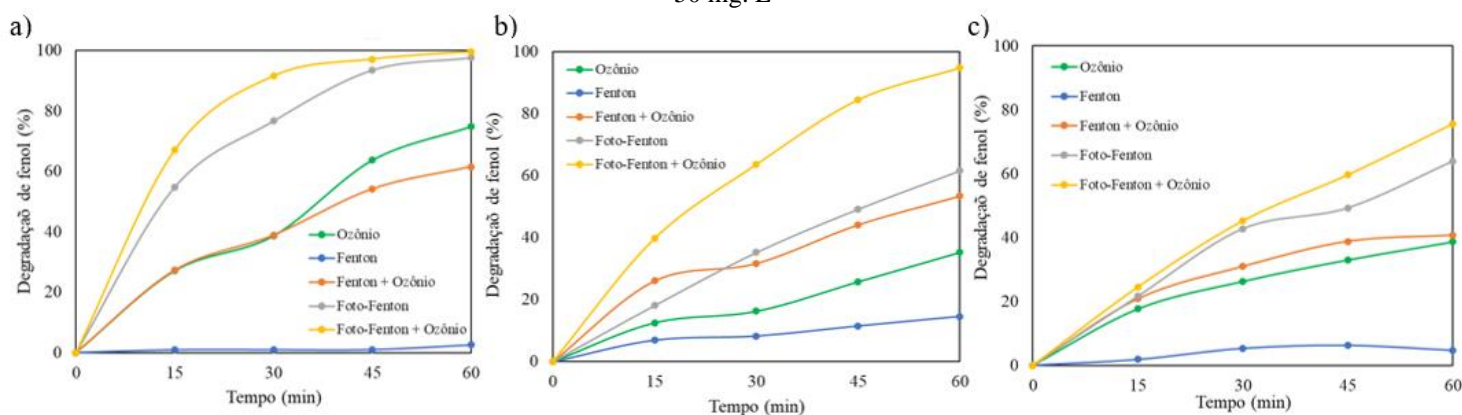
Foram realizados cinco processos de degradação: ozonização, Fenton, Fenton associado à ozonização, foto-Fenton e um processo foto-Fenton juntamente com a ozonização, com concentrações iniciais de 15, 30 e 50 mg. L⁻¹ de fenol. A solução contaminada sinteticamente foi preparada com água destilada e solução de fenol (solução fenol 5%, Dinâmica). Para o processo Fenton e foto-Fenton, resíduo de mineração de ametista (RA) foi usado como catalisador heterogêneo (por conter ferro em sua composição), e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) (Synth) como oxidante. A condição experimental utilizada para os ensaios foi estabelecida previamente ([RA] = 1 g. L⁻¹; [H₂O₂] = 10 mM; pH = 3,0). A irradiação para o processo foto-Fenton individualizado e o associado, foi obtida por meio do uso da lâmpada de iodetos metálicos (Ourolux, 150 W), que possui como valor de actinometria 0,2786 Einstein/s. A ozonização ocorreu por meio da inserção do ozônio (O₃) gerado por um ozonizador (Ozomax, concentração de 600 mg.h⁻¹). O pH inicial de todos os experimentos foi fixado em 3,0, o volume reacional foi de 150 mL e o tempo da reação foi de 60 min. Alíquotas de 5 mL foram retiradas a cada 15 minutos, filtradas e 0,9 mL do filtrado transferidos para um vial contendo 0,1 mL de metanol, para cessar a reação. A quantificação do fenol residual foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência acoplada à detecção ultravioleta (HPLC-UV, Shimadzu), no comprimento de onda de 270 nm.

Resultados e Discussão

Os resultados de degradação do fenol para os POAs realizados para as três concentrações iniciais avaliadas, encontram-se apresentados na Figura 1. Diante do exposto, percebe-se que utilizando apenas a ozonização, a melhor degradação para as concentrações iniciais de 15 mg. L⁻¹ (Figura 1a), 30 mg. L⁻¹ (Figura 1b) e 50 mg. L⁻¹ (Figura 1c) foram, respectivamente, 74,83%, 35,21% e 38,65%, sendo a maior degradação a de menor concentração inicial de fenol, apresentando as demais degradações valores similares. Estudos realizados com O₃ para degradar fenol, sob condições distintas, são relatados na literatura como um processo bastante promissor [4,5]. Para os processos Fenton, verificou-se que para as três distintas concentrações iniciais, o POA não apresentou uma boa performance, evidenciada pela baixa degradação do fenol. A máxima degradação foi de 14,53%, na concentração de 30 mg. L⁻¹ (Figura 1b – curva azul). O

baixo desempenho pode estar associado a ineficiência da geração de radicais hidroxilas nos meios reacionais. Entretanto, com o incremento do ozônio (processo Fenton + Ozônio – curva laranja), houve aumento na degradação dos três sistemas, com a máxima degradação na concentração de 15 mg. L⁻¹, com 61,51%. Considerando a necessidade do tratamento rápido e eficiente, foi estudado o processo foto-Fenton, com e sem ozônio, para verificar se haveria melhoria na degradação. O foto-Fenton (curva cinza) demonstrou ser o segundo melhor POA para degradação do fenol para as três concentrações analisadas, atingindo valores de 97,65%, 61,56% e 63,92% de remoção máxima de fenol para as concentrações iniciais de 15, 30 e 50 mg.L⁻¹, respectivamente.

Figura 1 – Resultados da degradação do fenol para os processos analisados: a) [Fenol]₀ = 15 mg. L⁻¹; b) [Fenol]₀ = 30 mg. L⁻¹; c) [Fenol]₀ = 50 mg. L⁻¹



Com o incremento do O₃, o processo combinado foto-Fenton + O₃ (curva amarela) demonstrou ser o melhor POA dos analisados no estudo, com taxas de 99,58%, 94,81% e 75,60%, da menor para a maior concentração inicial de fenol, com apenas uma hora de reação. Os resultados demonstram o efeito sinérgico entre os tipos de POAs utilizados e enfatizam que o O₃ intensificou a formação dos radicais que são responsáveis pela degradação do fenol, corroborando com um aumento da degradação, frente ao processo foto-Fenton. Tal comportamento já era esperado, tendo em vista a união das técnicas e intensificação da formação dos radicais, e condizente com a literatura [1].

Conclusões

O estudo demonstrou que o O₃ intensificou os processos Fenton e foto-Fenton e que a melhor degradação do fenol foi obtida quando se utilizou o sistema associado foto-Fenton e ozonização, com taxa de degradação máxima de 99,58%, na concentração inicial de 15 mg. L⁻¹. Entretanto, é importante salientar que apenas a ozonização já demonstrou possuir uma satisfatória capacidade de degradar o fenol e que, realizando melhorias neste processo, ele pode tornar-se mais viável frente aos demais, tendo em vista a menor utilização de outros agentes, reduzindo custos e melhorando a sustentabilidade do processo global.

Referências Bibliográficas

- [1] AGHAZADEH, M.; HASSANI, A. H.; BORGHEI, M. Application of photocatalytic proxone process for petrochemical wastewater treatment. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2023.
- [2] XIAO, W. et al. Interaction Mechanisms and Application of Ozone Micro/Nanobubbles and Nanoparticles: A Review and Perspective. *Nanomaterials*, MDPI, , 1 jun. 2022.
- [3] COSTA, S. I. G. et al. Towards the removal of soluble organic compounds present in oilfield produced water by advanced oxidation processes: Critical review and future directions. *Process Saf. Environ. Prot. Institution of Chemical Engineers*, 1 jun. 2023.
- [4] ESPLUGAS, S., GIMÉNEZ, J., CONTRERAS, S., PASCUAL, E., RODRIGUEZ, M. Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation. *Water Res.* 36, 1034–1042. 2002
- [5] KUSIC, H., KOPRIVANAC, N., BOZIC, A.L. Minimization of organic pollutant content in aqueous solution by means of AOPs: UV- and ozone-based technologies. *Chem. Eng. J.* 123, 127–137. 2006.

***Estruturas Metal-Orgânicas à Base de Cobalto para Aplicações em Fluidos de Perfuração Base Água:
Caracterização e Perspectivas Futuras***

João Pedro G. S. Soares*; Fabiola D. S. Curbelo; Fauston F. Silva; Renata M. Braga

Laboratório de Tecnologia Ambiental (LABTAM) – Departamento de Engenharia Química (DEQ/UFRN)

****joao.goncalves.081@ufrn.edu.br***

Introdução

Metal-Organic Frameworks (MOFs) são sólidos cristalinos obtidos por ligações coordenadas entre íons metálicos e ligantes orgânicos [1]. *Zeolitic-Imidazolate Frameworks* (ZIFs) constituem uma classe das MOFs e são formadas a partir de um metal de transição e de ligantes a base do imidazol [2]. O ângulo de ligação entre o metal e o ligante (145 °) formam uma estrutura cristalina que se assemelha à estrutura das zeólitas convencionais a base de silício, motivo pelo qual estas estruturas são denominadas ZIFs [3].

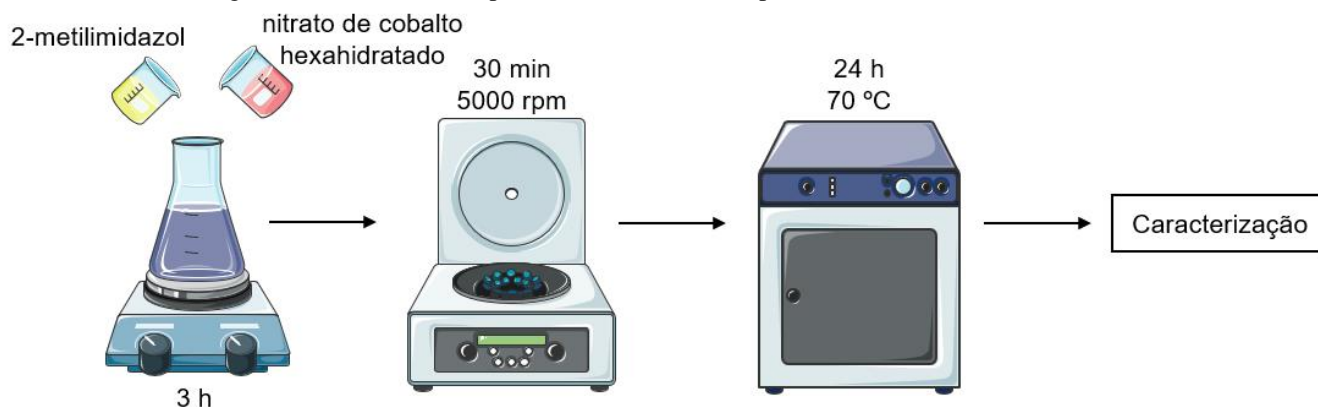
Recentemente, alguns trabalhos vêm apontando estes materiais como promissores em aplicações em fluidos de perfuração para poços de petróleo [4]. Nestes artigos, a adição de baixas concentrações de ZIFs na formulação de fluidos de perfuração favorece algumas propriedades reológicas importantes do fluido, como viscosidade plástica, ponto de escoamento e capacidade de carrear os cascalhos de perfuração [4]. A limitação destes estudos está na análise restrita em condições de baixas pressões e temperaturas – LPLT (do inglês, *Low Pressure Low Temperature*), visto que fluidos base água não são tecnicamente eficientes em campos de temperatura e pressão elevadas – HPHT (do inglês, *High Pressure High Temperature*) devido às suas características relativamente pobres de inibição de xisto, lubricidade e estabilidade térmica [5].

Por isso, este trabalho tem como objetivo principal obter e caracterizar cristais de MOFs à base de cobalto e avaliar seu potencial de aplicação em formulações de fluidos de perfuração para poços de petróleo, estudando sua influência e performance tanto em condições LPLT quanto HPHT. Nesse sentido, este trabalho aborda resultados prévios da caracterização do material e avalia perspectivas futuras de sua aplicação em fluidos de perfuração.

Metodologia

O procedimento metodológico adotado está descrito na Figura 1. A síntese da MOF de cobalto foi realizada com base na mistura proporcional de 2-metilimidazol e nitrato de cobalto hexahidratado dissolvidos em água deionizada, em pressão e temperatura ambiente [6]. Essa solução foi mantida sob agitação por 3 h e, em seguida, os cristais da MOF foram coletados via centrifugação e secos em estufa à 70 °C. O pó obtido foi caracterizado por técnicas de DRX, FTIR, MEV, BET e TG/DTA. Também foi obtida uma distribuição de tamanho de partículas por análise de imagem através do *software* ImageJ.

Figura 1. Procedimento experimental desenvolvido para a síntese da MOF de cobalto.



Fonte: Autores (2025).

Após caracterizado, o material é incorporado nos fluidos de perfuração. Em seguida, os fluidos base água são formulados com diferentes concentrações da MOF obtida. São também avaliadas as propriedades reológicas e de filtração de todos os fluidos obtidos, além de avaliar a estabilidade destas propriedades ao longo do tempo. Por fim, também é avaliada a presença e estabilidade da MOF após aplicação em condições HPHT.

Resultados e Discussão

A síntese do material foi realizada com rendimento médio reacional de 60 % em mol. O padrão de difração da MOF indica a pureza da fase obtida de acordo com o banco de dados da CCDC (*The Cambridge Crystallographic Data Centre*), na ficha 671073. A intensidade do pico em $2\theta = 12,77^\circ$ sugere o maior crescimento dos cristais na direção do plano (211). Nos espectros de absorção na região do infravermelho, é possível observar os principais modos vibracionais típicos da MOF obtida [7], como a banda em 426 cm^{-1} referente à ligação do ligante com o metal (Co-N), além dos sinais de estiramentos assimétrico e simétrico do grupo metil (em 2958 e 2924 cm^{-1} , respectivamente).

As imagens de MEV da amostra revelaram uma morfologia semelhante ao padrão dodecaédrico da ZIF, de acordo com a estrutura reportada na ficha 671073 do banco de dados da CCDC. Além disso, a MOF foi obtida com diâmetro de partícula médio de $1,5\text{ }\mu\text{m}$, de acordo com a análise de imagem via ImageJ. A ZIF obtida apresenta uma área superficial de $601,8\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ e área de microporos em torno de $513,8\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$, de acordo com a porosimetria via método BET.

A curva termogravimétrica da MOF revela a saída de espécies de solventes adsorvidas na superfície externa e interna do material, com perda de massa em torno de 32,4 % até uma temperatura de 291°C . Entre 291 e 488°C , há uma perda de massa de 42,2 % referente à degradação da estrutura da MOF. Neste caso, a estabilidade térmica da ZIF obtida é de 291°C , ficando como resíduo, isto é, o óxido de cobalto, uma porcentagem de massa de aproximadamente 23,8%.

Conclusões

O conjunto de caracterizações avaliado neste trabalho traz informações sobre a estrutura e a morfologia do material sintetizado, que são de suma importância para a aplicação da MOF na formulação dos fluidos de perfuração. A síntese e caracterização do material indicam um potencial promissor de aplicação desse material em formulações de fluidos de perfuração para poços de petróleo. Nesse sentido, todos os resultados obtidos estão dentro dos padrões relatados pela literatura e, a partir de então, serão avaliadas as influências da presença da MOF nos fluidos de perfuração.

Referências Bibliográficas

- Hou, C. C.; Xu, Q. *Advanced Energy Materials*, vol. 9, n. 23, p. 1–18, 2019.
- Zhong, G.; Liu, D.; Zhang, J. *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 6, n. 5, p. 1887–1899, 2018.
- Saliba, D.; Ammar, M.; Rammal, M.; Al-Ghoul, M.; Hmadeh, M. *Journal of the American Chemical Society*, vol. 140, n. 5, p. 1812–1823, 2018.
- Iddrisu, M.; Onaizi, S. A. *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 228, n. April, p. 212007, 2023.
- Ibrahim, Z. Z.; Hamidi, H.; Afzal, W.; Huseyin, M. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 701, n. July, p. 134912, 2024.
- Yan, J.; Gong, L.; Chai, S.; Guo, C.; Zhang, W.; Wan, H. *Chemical Engineering Journal*, vol. 458, p. 141456, Feb, 2023.
- Kwon, H. T.; Jeong, H. K.; Lee, A. S.; An, H. S.; Lee, J. S. *Journal of the American Chemical Society*, vol. 137, n. 38, p. 12304–12311, 2015.

Valorização de Resíduos Lignocelulósicos do Coco e da Cana-de-Açúcar na Produção de Triacetato de Celulose

Otávio L. da Silva*; Wildson B.B. Lima; Kayky A. da Silva; Liana F. Padilha; Everaldo S. dos Santos
Laboratório de Engenharia Bioquímica - Departamento de Engenharia Química

****otavio.lima.116@ufrn.edu.br***

Introdução

O Brasil é o país com maior rendimento de produção de coco no cenário global. Segundo dados de relatório divulgado pelo BNB em 2021, foram produzidas 13 toneladas por hectare (ha) desse fruto. Consequência da alta produção, as cascas geradas por essa cultura representam até 85% do peso desse fruto e 70% do lixo gerado nas praias do país. Comumente, o resíduo é descartado em aterros, tornando-se potencial emissor de gás metano [1]. Em relação à produção de Cana-de-açúcar, a previsão para safra 24/25 é de uma produtividade de 78 t/ha. O plantio de cana é a cultura responsável pela maior geração de resíduos no país, representando 30% da cana moída [2]. Esses resíduos são denominados materiais lignocelulósicos, formados por celulose, hemicelulose e lignina. Este último atribui rigidez ao material, enquanto a celulose e a hemicelulose são as fontes de açúcares ligadas a lignina [3]. Esses materiais são potenciais insumos para produção de biocombustíveis e polímeros como XOS (usado como prebiótico) e acetato de celulose (AC). O AC é obtido a partir do processo de acetilação dos carbonos da cadeia de celulose. A conversão química da celulose é realizada a fim de modificar algumas de suas características, como sua elasticidade e a capacidade de adsorção ou troca iônica. Por ser um polímero neutro e de baixo custo, o AC pode ser aplicado em diversas áreas para absorção de óleo e de metais, no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos, para síntese de membranas em processos de filtração ou separação de gases etc [4]. Este trabalho teve como objetivo produzir o Triacetato de Celulose (TAC) a partir da celulose obtida da fibra da casca de coco e do bagaço de cana-de-açúcar.

Metodologia

Purificação das biomassas lavadas, secas, moídas e peneiradas: NaOH 5% (m/v) e H₂O₂ 35%, na proporção de 2:1 (v/v), foram adicionados a biomassa em proporção de 6% (m/v). O meio foi agitado por 90 minutos e filtrado. Repetiu-se o procedimento com o sólido obtido por 2x. O sólido foi seco em dessecador por 24h. Caracterização físico-química da Biomassa *in natura* e Pré-tratada: Foi realizada a caracterização físico-química dos materiais *in natura* e pré-tratados para teores de extraíveis, lignina insolúvel, celulose, hemicelulose e cinzas de acordo com método adaptado da NREL - *National Renewable Energy Laboratory* [5]. Síntese de TAC: Para a etapa de acetilação do material purificado foi utilizado método descrito por Meireles (2007) [6]. Determinação do grau de substituição (GS): A técnica de volumetria de neutralização foi utilizada para determinar o GS das amostras de AC [6]. Com os dados obtidos, foram realizados os cálculos do percentual de grupos acetila (% GA) e do grau de substituição (GS).

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extraíveis e cinzas apresentadas pelas biomassas *in natura* e após pré-tratamento.

A caracterização físico-química indicou a redução em cerca de 50% do teor de lignina para ambas as biomassas. Entretanto, ainda se faz necessário o estudo das variáveis da metodologia de purificação das biomassas a fim de se reduzir ainda mais esse teor. A caracterização das amostras de AC mostrou que foi possível obter um grau de substituição próximo à 3 para os acetatos de celulose de fonte comercial, de fibra da casca de coco e do bagaço de cana-de-açúcar, o que indica a triacetilação dos carbonos 1,3 e 6 na cadeia de celulose.

Tabela 1. Caracterização físico-química das biomassas de fibra de coco e bagaço de cana-de-açúcar in natura e pré-tratadas.

Amostras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Extraíveis (%)	Cinzas (%)
Fibra da Casca de Coco in natura	27,3 ± 0,9	18,2 ± 1,1	29,5 ± 0,1	20,4 ± 0,9	3,5 ± 0,3
Fibra da Casca de Coco – M2	53,1 ± 1,5	19,8 ± 0,5	14,1 ± 1,8	11,5 ± 1,8	1,0 ± 0,1
Bagaço de Cana-de-açúcar in natura	27,5 ± 2,9	22,6 ± 1,6	16,1 ± 1,1	4,9 ± 0,6	2,3 ± 0,2
Bagaço de Cana-de-açúcar – M2	46,5 ± 1,2	17,5 ± 1,3	7,5 ± 1,3	2,6 ± 1,6	1,3 ± 0,2

A tabela 2 apresenta os dados de caracterização obtidos. Na determinação do Grupos Acetila (GA), Pinheiro et al. (2019) reportaram um valor de 64,5% de grupos acetila, o que indica a formação de TAC [7]. Foi obtido uma média de 42% de grupos acetila por Barcellos (2015) [8], semelhante aos resultados obtidos neste trabalho. Apesar do percentual de grupos acetila semelhante entre as três amostras, é necessário a realização da caracterização dos acetatos a fim de identificar as substâncias presentes, já que a caracterização físico-química apontou presença de lignina nos materiais pré-tratados. Ainda, foi obtido rendimento mássico superior a 20,0% para ambas as biomassas.

Tabela 2. Grau de substituição e % de grupos acetila dos sólidos após a etapa de acetilação.

Fonte de Celulose	Grau de Substituição (% grupos acetila)	Rendimento (m _{acetato} /m _{inicial} ¹)
Comercial	3,23 (46,69)	NA ²
Casca do Coco verde	3,14 (45,90)	25,0%
Bagaço de Cana-de-açúcar	3,37 (47,69)	21,2%

¹Biomassa in natura, ²Não se aplica

Referências Bibliográficas

- [1] BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. Coco: produção e mercado. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n. 206, dez. 2021.
- [2] CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da Safra de Cana-de-Açúcar. 3º Levantamento, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 29 jan. 2025;
- [3] SILVA, A. C.; PEREIRA, B. R.; OLIVEIRA, C. D. Gestão de Resíduos da Cana-de-Açúcar para Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis. Revista de Engenharia e Sustentabilidade Ambiental, v. 7, n. 1, p. 15-25, 2018.
- [4] SILVA, Valdic Luiz da. Aproveitamento sustentável do bagaço de cana de açúcar para obtenção do acetato de celulose. 2014. 90 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- [5] SLUITER, A.; HAMES, B.; HYMAN, D.; PAYNE, C.; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER, J.; TEMPLETON, D.; WOLFE, J. Determination of total solids in biomass and total dissolved solids in liquid process samples. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [6] MEIRELES, Carla da Silva. Síntese e caracterização de membranas de acetato de celulose, obtido do bagaço de cana-de-açúcar, e blendas de acetato de celulose com poliestireno de copos plásticos descartados. 2007. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [7] PINHEIRO, Gabriela; DÖGE, Maiely; DE ARAUJO, Larissa; *et al.* Síntese do acetato de celulose a partir da bainha foliar da Palmeira-Real Australiana (*Archontophoenix alexandrae*). [s.l.: s.n.], 2019.
- [8] BARCELLOS, Cátia Pereira. Reciclagem química da fibra da casca do coco para síntese de acetato de celulose e produção de membranas. Monografia de Conclusão de Curso, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, 2015.

Equilíbrio Líquido-Vapor do Sistema Óleo de Eucalipto da Pirólise Diluído em Etanol

Layssa Cristine Alves; Arthur V. V. Bezerra; Anderson Alles de Jesus; Osvaldo Chiavone-Filho*

Lab. de Fotoquímica Aplicada e Equilíbrio de Fases – Programa de PG em Engenharia Química (UFRN)

**layssa.alves.089@ufrn.edu.br*

Introdução

O petróleo foi essencial para o desenvolvimento econômico e industrial, mas seu uso intensivo tem gerado sérios impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa e exploração insustentável. Nesse cenário, a biomassa surge como uma alternativa promissora, permitindo a produção de biocombustíveis, eletricidade e calor, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Entre as diversas matérias-primas disponíveis, destaca-se o eucalipto, uma fonte renovável com rápido crescimento, alta produtividade e boa adaptação a diferentes solos, especialmente em países como o Brasil. O eucalipto é uma excelente opção para a produção sustentável de energia [1].

O estudo do equilíbrio líquido-vapor (ELV) é crucial na biorrefinaria para otimizar processos de separação como destilação e evaporação. Ele descreve a relação entre fases líquida e vapor, considerando temperatura, pressão e composição, permitindo a separação eficiente de biocombustíveis e bioprodutos, como etanol e bio-óleo. Compreender o ELV é essencial para projetar operações que maximizem a pureza dos produtos e a eficiência energética, além de prever o comportamento de misturas complexas, comuns na biorrefinaria. Isso contribui para processos mais sustentáveis e economicamente viáveis.

Metodologia

A realização deste trabalho se dá a partir da calibração dos termômetros, do medidor de pressão e da densidade (pelo teste de solubilidade em etanol em diferentes concentrações), e posteriormente, utilizou-se o bio-óleo de eucalipto diluído em etanol aplicado ao ebulliômetro Othmer a fim de estudar o equilíbrio líquido-vapor de um sistema real.

A calibração dos termômetros digitais foi medida utilizando quatro temperaturas: a de ebulição e fusão da água e os pontos de ebulição do etanol e acetona que foram calibrados juntamente com o medidor de pressão no ebulliômetro Othmer, o qual foi utilizado pressões de 926 a 400 mbar, comparou-se a leitura do termômetro com os pontos de referência e a temperatura e a pressão foram ajustadas pela equação de Antoine. A calibração da densidade foi realizada após verificar a faixa de densidade de composições distintas de óleo e etanol, onde partiu-se de 70% de etanol a 95% de etanol, variando de 5 em 5% o qual descreve a faixa de solubilidade do óleo em álcool.

A partir das calibrações realizadas, foram determinados os pontos experimentais do ELV para o sistema pseudo binário: óleo de eucalipto + etanol, na faixa de composição definida entre 100% à 70% em álcool.

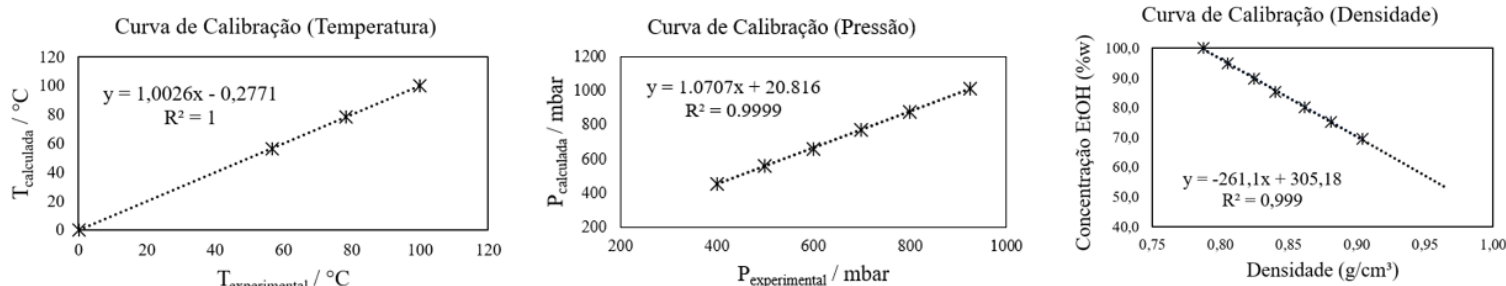
Foram estudados, inicialmente, três pontos experimentais: um correspondendo ao etanol puro (100%) e os outros dois correspondendo à mistura de 92,5% em álcool + 7,5% em óleo, nas condições de com e sem atmosfera de nitrogênio.

Resultados e Discussão

As curvas de calibração da temperatura, pressão e densidade podem ser visualizadas na Figura 1.

Observa-se em todas as curvas a linearidade dos dados, inexistência de dispersão dos pontos de dados e um R^2 bem próximo de 1. O termômetro estava em conformidade com os padrões, o medidor de pressão foi ajustado com sucesso e o densímetro apresentou leituras precisas, o que garante resultados confiáveis para análises termodinâmicas.

Figura 1 - Curvas de Calibração de Temperatura, Pressão e Densidade.

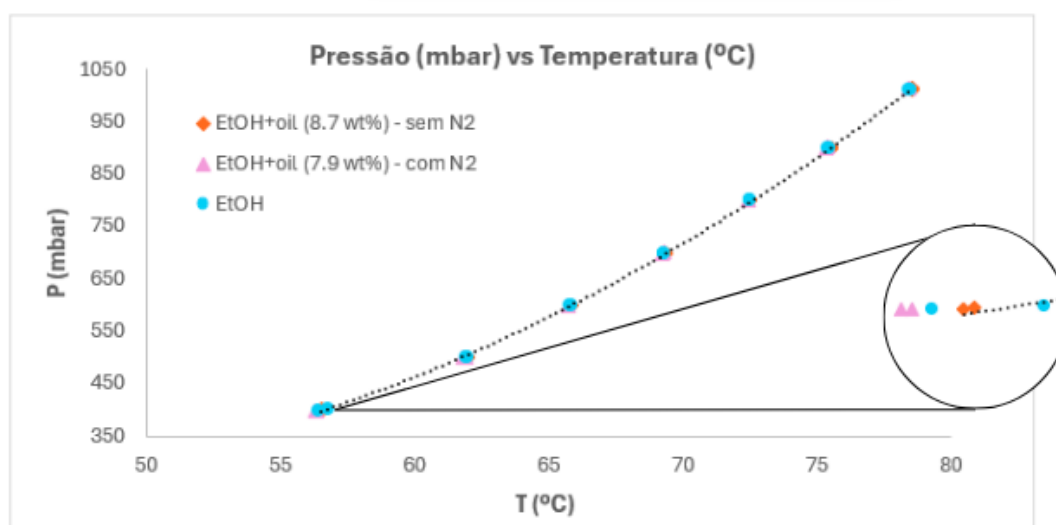


Fonte: Autoria Própria, 2025.

A partir dos dados experimentais obtidos e da Figura 2 abaixo, verificou-se que: A temperatura da fase líquida é a que melhor representa o equilíbrio; Em grande escala não percebe-se diferenças do comportamento dos dados da curva P versus T, para o ponto de mistura à 92,5% em etanol e 7,5% em óleo, em comparação ao etanol puro. Porém, quando amplia-se o gráfico, podemos perceber um afastamento dos pontos, que ainda assim não é tão significativa devido à predominância de etanol no sistema; As densidades das fases líquida e vapor, ao final do experimento, apresentaram valores maiores que a densidade do etanol, o que corresponde à presença de pequenas gotículas de óleo arrastadas pelo vapor do álcool e/ou outra substância presente na composição química do óleo.

Figura 2 - Pressão (mbar) versus temperatura (celsius) para os três sistemas: etanol puro (100%) e a mistura de 92,5% em álcool + 7,5% em óleo, nas condições de atmosfera com nitrogênio e ar.

Fonte: Autoria Própria, 2025.



Conclusões

A calibração mostrou-se bem-sucedida, o que garantirá medições precisas e confiáveis para o estudo, reduzindo incertezas experimentais, aumentando a segurança operacional e permitindo uma análise detalhada das propriedades termodinâmicas das misturas. Esse processo garante que o instrumento forneça dados consistentes sobre a pressão de vapor e a composição de misturas, fundamentais para aplicações como análise de ELV.

Quanto aos dados de ELV, é necessário realizar uma análise cromatográfica (CG) para determinação dos componentes que compõem cada fase e melhor descrever os valores de densidade. As demais composições de mistura serão avaliadas, no que diz respeito ao aumento da concentração de óleo.

Referências Bibliográficas

- [1] RODRIGUES, Letícia Demuner. Contribuições para o estudo da pirólise da casca de eucalipto. 2018. 70 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2018.
- [2] Melo, A. C. C. de. Equilíbrio líquido-líquido aplicado à separação de produtos da pirólise de biomassa. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014.

Análise de Microssistema Contínuo na Captura de CO₂ com Solução de MEA

Éntony D. Dantas; Gleyson B. Oliveira; Carlos E. A. Padilha, Fedra A. V. Ferreira; Domingos F. S. Souza, Osvaldo Chiavone-Filho*

*Laboratório de Energia Alternativa e Fenômenos de Transporte e Departamento de Engenharia Química
entonydd@gmail.com

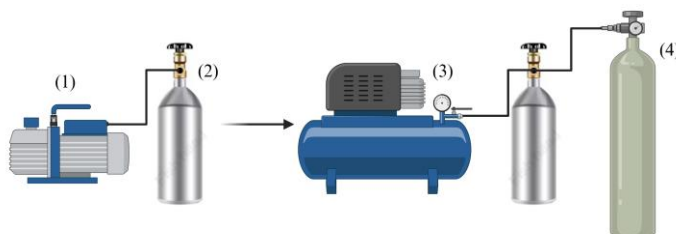
Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias para mitigação de CO₂, um dos principais contribuintes para o aquecimento global [1]. Dentre as tecnologias de captura, a absorção química utilizando monoetanolamina (MEA) tem recebido ampla atenção devido à sua eficiência na remoção de CO₂ de correntes gasosas. A MEA reage de forma seletiva com o CO₂, formando compostos estáveis que podem ser posteriormente regenerados em etapas de dessorção, permitindo a reutilização do solvente [2]. Embora esse processo seja bem estabelecido em escala industrial, a análise de seu desempenho em microssistemas representa uma fronteira de pesquisa emergente, oferecendo perspectivas de maior eficiência energética e redução de custos operacionais [3]. Nesse contexto, este trabalho busca investigar o desempenho da solução de MEA na captura de CO₂ em um microssistema, avaliando parâmetros como eficiência de captura e concentração de solvente.

Metodologia

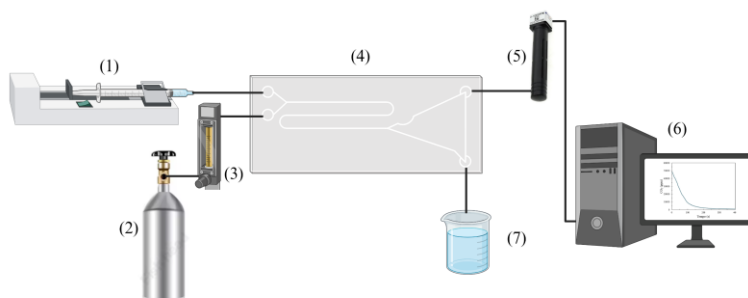
Os ensaios com microssistemas utilizaram MEA nas concentrações de 0,5M e 0,01M, com uma composição fixa de CO₂ entre 4-6% vol, representando gases de pós-combustão industrial. A mistura foi preparada aplicando vácuo no cilindro, seguido pela adição de ar comprimido e CO₂ até alcançar a concentração desejada, conforme a Figura 1.

Figura 1. Preparo da carga de CO₂. (1) Bomba de vácuo; (2) Cilindro de gás 1L; (3) Compressor de ar; (4) Cilindro de CO₂.



Em seguida, o cilindro é conectado ao microssistema (Figura 2), onde a carga inicial de CO₂ é medida pelo sensor, estabilizando a concentração com vazão fixa de gás. Em seguida, o experimento começa com vazões de (G=20 mL/min e L=10 mL/min), e é monitorado a queda na concentração de CO₂ com o tempo.

Figura 2. Aparato experimental do microssistema. (1) Bomba seringa; (2) Cilindro com mistura CO₂+Ar; (3) Rotâmetro; (4) Placa de microssistema; (5) Sensor de CO₂ – fase gasosa; (6) Computador; (7) Becker – fase líquida.

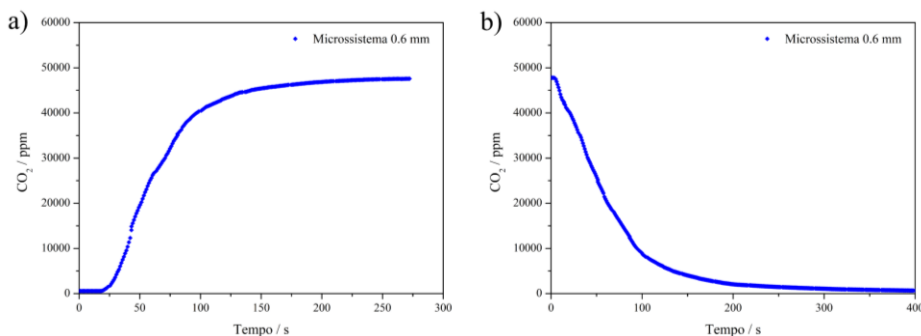


O microssistema possui entrada em Y (gás e líquido), tubulação de 150 mm com 0,6 mm de diâmetro e separador gás-líquido ao final. Os ensaios também incluíram uma mangueira (3 mm x 95,8 mm) e um misturador estático de mesmo tamanho para comparação dos resultados.

Resultados e Discussão

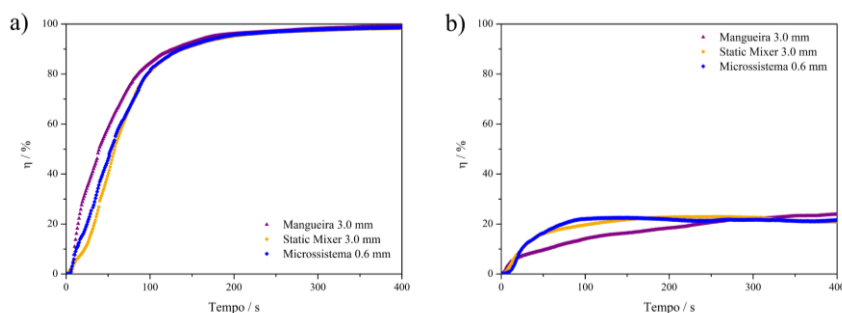
A Figura 3 ilustra o padrão de um ensaio de captura, com a estabilização da carga à esquerda e o decaimento da concentração de CO₂ à direita. As curvas foram obtidas em duplicata para os três sistemas testados (microsistema, misturador estático e mangueira). Entretanto, devido à variação da carga inicial (4-6% vol), os resultados foram analisados em termos de eficiência.

Figura 3. Comportamento da Captura de CO₂ com o tempo. a) Medida da carga. b) Captura com MEA 0.5M



A Figura 4 apresenta as curvas de eficiência de captura ao longo do tempo para MEA a 0,5M e 0,1M. A 0,5M, todas as curvas se estabilizam em ~200 s, enquanto a 0,1M, o microsistema atinge a estabilização mais rapidamente (~100 s) em comparação aos outros sistemas.

Figura 4. Eficiência de captura ao longo do tempo. a) ensaios à 0.5M de MEA. b) ensaios à 0.01M de MEA.



A Tabela 1 compara as eficiências de estabilização no microsistema. Para MEA a 0,5M, não houve diferença significativa entre os sistemas, atribuída ao regime químico predominante. Já a 0,01M, o microsistema demonstrou desempenho superior. O resultado destacou o impacto positivo das características do microsistema, como maior eficiência na transferência de massa e calor. Mesmo com um tempo de residência até 10 vezes menor, o microsistema alcançou eficiências semelhantes aos outros sistemas, demonstrando sua eficácia na captura.

Tabela 1. Comparação da eficiência de captura com o tempo de residência em diferentes sistemas

Sistema	[MEA]	Microsistema (0.6mm)	Static Mixer (3mm)	Mangueira (3mm)
$\eta_{m\acute{e}dia}$ (%)	0.5M	98.61	98.27	98.96
	0.01M	22.02	19.67	14.07
Tempo de Residência (s)	-	0.13	1.30	2.03

^aEficiência média de captura foi calculada pela equação: $\eta = \left(\frac{n_{CO_2,in} - n_{CO_2,out}}{n_{CO_2,in}} \right) \times 100$.

Referências Bibliográficas

- [1] Vaz, S.; Rodrigues de Souza, A. P.; Lobo Baeta, B. E. Technologies for Carbon Dioxide Capture: A Review Applied to Energy Sectors. *Cleaner Engineering and Technology*. Elsevier Ltd June 1, 2022.
- [2] Shi, H.; Zhou, Y.; Si, M.; Zuo, Y.; Kang, S.; Wang, Y.; Cui, L.; Idem, R.; Tontiwachwuthikul, P.; Liang, Z. Amine Regeneration Tests on MEA, DEA, and MMEA with Respect to Carbamate Stability Analyses. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 2017, 95 (8), 1471–1479.
- [3] Aghel, B.; Heidaryan, E.; Sahraie, S.; Nazari, M. Optimization of Monoethanolamine for CO₂ Absorption in a Microchannel Reactor. *Journal of CO₂ Utilization* 2018, 28, 264–273.

Síntese de Aerogel de Grafeno a Partir da Biomassa da Calotropis Procera: Desafios e Aplicações em Separação de Misturas Água-Óleo

Adison P.S. Junior*; Osvaldo Chiavone-Filho; José H.O. Nascimento;

Programa de Pós graduação em Engenharia Química

****adison.junior.017@ufrn.edu.br,***

Introdução

Os aerogéis de grafeno se destacam por suas propriedades únicas, como ultra leveza, alta porosidade e estrutura tridimensional, que oferecem uma grande área de superfície, essencial para a absorção seletiva de óleo. Sua hidrofobicidade extrema impede a absorção de água, enquanto sua capacidade de reter grandes quantidades de óleo os torna ideais para a remediação de águas contaminadas, especialmente por derramamentos de petróleo e outras substâncias oleosas. Além disso, as características de alta condutividade térmica e elétrica, bem como notável elasticidade garantem a durabilidade e eficiência desses materiais, mesmo em condições adversas de separação de água e óleo [1].

A planta *Calotropis*, tradicionalmente conhecida por suas fibras naturais, possui uma biomassa rica em celulose e outros compostos orgânicos que podem ser convertidos em precursores de carbono para a síntese de aerogéis de grafeno. Estudos recentes indicam que a combinação de aerogéis de grafeno, com matrizes poliméricas, ou outros materiais híbridos, melhora significativamente as propriedades mecânicas e a funcionalidade desses materiais, ampliando suas aplicações tecnológicas. A revisão realizada por Qi et al. (2023) [2] destaca os avanços nos métodos de produção e caracterização, enquanto Wang et al. (2024) [3] exploram o impacto das microestruturas reconfiguradas na performance de aerogéis aplicados a interfaces homem-máquina. Esses avanços indicam que o desenvolvimento de aerogéis sustentáveis não é apenas uma tendência, mas uma necessidade para atender às demandas industriais e ambientais atuais.

A separação eficiente de misturas água-óleo é um grande desafio ambiental, especialmente em contextos de petróleo, onde os derramamentos geram impactos ecológicos graves. Aerogéis de grafeno, com sua alta hidrofobicidade e capacidade de absorção seletiva, oferecem soluções eficazes para a remediação de águas contaminadas por óleo. Ao incorporar biomassa renovável como a de *Calotropis*, é possível obter materiais de alto desempenho com menor impacto ambiental.

Este trabalho investiga a utilização da biomassa de *Calotropis* na produção de aerogéis de grafeno, buscando fornecer uma solução inovadora e sustentável para a separação de misturas água-óleo, com ênfase em derramamentos de petróleo, contribuindo para a resolução de um importante desafio ambiental.

Metodologia

A fibra da *Calotropis Procera* é considerada uma fonte abundante e pouco explorada, rica em compostos orgânicos que podem ser convertidos em grafeno por meio de processos controlados. A metodologia adotada neste trabalho é projetada para assegurar resultados consistentes e reprodutíveis. O processo inclui etapas fundamentais como a coleta e preparação da biomassa, tratamento térmico, dispersão, gelificação, formação do aerogel, seguidas pela purificação e secagem final.

A *Calotropis* é obtida de fontes sustentáveis e passa por um cuidadoso processo de limpeza e maceração para remover impurezas, garantindo um material homogêneo. Em seguida, a biomassa é tratada termicamente com a adição de um catalisador, promovendo a decomposição dos compostos orgânicos e favorecendo a formação de óxido de grafeno reduzido.

O óxido de grafeno reduzido resultante é disperso em água deionizada utilizando um agitador magnético, assegurando uma dispersão homogênea e estável. Para a formação do aerogel, a solução contendo óxido de grafeno reduzido é

combinada com um agente de gelificação, e o pH da mistura é ajustado, permitindo a formação de um gel consistente. O gel é então submetido a um processo de secagem, criando uma estrutura tridimensional porosa. Para a purificação e secagem final, o aerogel é enxaguado com etanol para remover impurezas e colocado em um dessecador com sílica gel, garantindo a remoção completa da umidade residual e otimizando a porosidade do material.

Após a obtenção do material, diversas análises para caracterizar suas propriedades são realizadas visando avaliar sua qualidade. A análise de Difração de Raios-X (DRX) permite identificar as fases cristalinas presentes, enquanto a Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) identifica os grupos funcionais do material. A Espectroscopia Raman contribui na caracterização das propriedades vibracionais e a estrutura do grafeno, enquanto a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Microscopia Eletrônica de Transmissão de Alta Resolução (HRTEM) fornecem informações sobre a morfologia e a estrutura interna do material. A Espectroscopia de Foto Emissão de Raios X (XPS) permite analisar a composição elementar e os estados de oxidação, e o Potencial Zeta permite entender as interações das folhas de GO em solução e avaliar a estabilidade da dispersão.

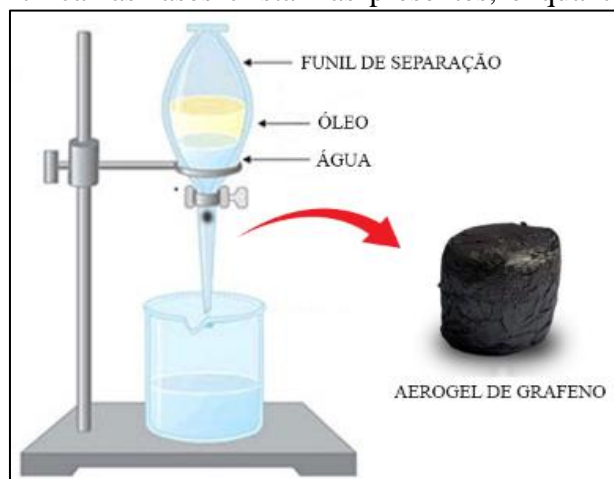


Figura 1 – Representação esquemática do sistema de separação de mistura água e óleo.

Resultados e Discussão

Ao finalizar a aplicação desta metodologia, espera-se obter aerogéis de grafeno derivados da biomassa de *Calotropis* com alta eficiência na separação de misturas água-óleo, especialmente em contextos relacionados ao petróleo. Os resultados dessa pesquisa têm grande potencial para oferecer soluções práticas para desafios industriais, como a remoção de óleo de superfícies aquáticas e o tratamento de efluentes contaminados com petróleo.

A combinação das pesquisas atuais sobre a produção de grafeno a partir da biomassa, com ênfase na fibra de *Calotropis*, e uma metodologia inovadora para a formação de aerogéis, promete uma abordagem eficaz para a separação de água e óleo. A aplicação desse método pode não apenas melhorar a eficiência de processos de separação, mas também reduzir custos e impactos ambientais associados ao tratamento de misturas oleosas.

Em perspectiva, a utilização de grafeno derivado de biomassa para a separação de misturas água-óleo representa um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais. O uso de aerogéis pode resultar em materiais com alta capacidade de adsorção e seletividade, contribuindo para a remoção eficaz de óleo de águas contaminadas. Essa abordagem tem o potencial de redefinir os padrões de eficiência e sustentabilidade em processos de separação, oferecendo uma solução inovadora e de baixo impacto ambiental para o manejo de resíduos oleosos.

Referências Bibliográficas

- [1] Wang, Z.; Liu, L.; Zhang, Y.; Huang, Y.; Liu, J.; Zhang, X.; Liu, X.; Teng, H.; Zhang, X.; Zhang, J.; et al. A Review of Graphene-Based Materials/Polymer Composite Aerogels. *Polymers*, 15, 1888, 2023.
- [2] Qi, P.; Zhu, H.; Borodich, F.; Peng, Q. A Review of the Mechanical Properties of Graphene Aerogel Materials: Experimental Measurements and Computer Simulations. *Materials*, 16, 1800, 2023.
- [3] Wang, Y.; Qin, Z.; Wang, D.; Liu, D.; Wang, Z.; Jazzar, A.; He, P.; Guo, Z.; Chen, X.; Jia, C.; et al. Microstructure-Reconfigured Graphene Oxide Aerogel Metamaterials for Ultrarobust Directional Sensing at Human–Machine Interfaces. *Nano Letters*, 24, 12000–12009, 2024.

Um Sistema de Visão Computacional Baseado em Redes Neurais Convolucionais para Tomada de Decisões em um Protótipo Sistema Flexível de Manufatura

Rafael S. N. Freire; Jefferson I. D. Silva; Adilson J. de Oliveira*

Laboratório de Manufatura e Departamento de Engenharia Mecânica

**rafael.serafim.706@ufrn.edu.br*

Introdução

Com o avanço da tecnologia, os processos produtivos contínuos, característicos da Indústria do Petróleo e Gás, enfrentam o desafio de se adaptar à variabilidade da demanda do mercado. Para lidar com essa necessidade, a integração de tecnologias da informação aos sistemas de produção, apresenta-se como uma solução viável. Já os Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS), utilizados em produções em lote de itens similares, consistem em um conjunto de máquinas-ferramenta controladas por comandos numéricos (CNC's), interligadas por sistemas de transporte e manipulação coordenados por um sistema de tomada de decisões [1]. Nesse contexto, a integração tecnológica em um FMS pode ser viabilizada pelo uso de transdutores, que capturam dados do ambiente físico e os fornecem para algoritmos inteligentes responsáveis pelas decisões do sistema.

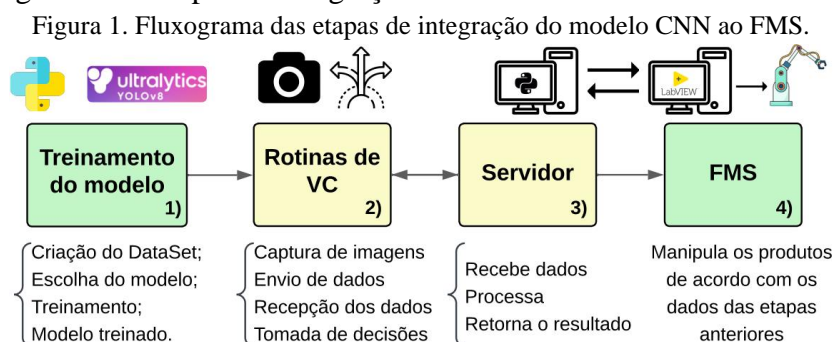
Para o reconhecimento de produtos, por exemplo, pode-se usar câmeras para a extração de dados visuais associados a rotinas de Visão Computacional (VC). A VC é um subcampo da Inteligência Artificial (IA), com o objetivo de extrair características de imagens, processar e exibir a informação desejada [2]. Logo, um algoritmo para o reconhecimento de padrões se faz necessário. Existem diversos algoritmos para extração de padrões em imagens, entretanto, para objetos com geometrias complexas detalhadas, a literatura associa essa função às Redes Neurais Convolucionais Artificiais (CNN's).

As Redes Neurais Artificiais (ANN's) são arquiteturas de processamento de imagens compostas por “camadas de processamento”, sendo as camadas de entrada (objetos a serem reconhecidos), as camadas intermediárias (filtram as informações da entrada) e as camadas de saída (retornam o possível resultado de acordo com as informações analisadas) em que cada camada é composta por neurônios artificiais, que são funções matemáticas associadas a pesos. Para as CNN's, há também um filtro convolucional na entrada dessas camadas, como o contorno de bordas e destaque de texturas, o que permite a localização espacial das imagens, diminuindo o número de parâmetros necessários para o processo, aumentando a eficiência do mesmo [3].

Portanto, o objetivo dessa pesquisa é integrar um modelo de CNN em um protótipo de FMS, disponível do LabMan da UFRN, para o reconhecimento de produtos a serem processados e o suporte da tomada de decisões do sistema, como o destino de transporte e processamento. Além disso, os conceitos usados nessa pesquisa podem ser extrapolados para indústria do petróleo e gás, devido ao aspecto transversal da pesquisa.

Metodologia

A Figura 1 ilustra um fluxograma das etapas de integração da CNN ao FMS.



Como observado na Figura 1, as seguintes etapas foram desenvolvidas: 1) O modelo de CNN, com arquitetura YOLOv8 da Ultralytics, foi treinado para reconhecer produtos por meio de um dataset próprio, composto por arruelas, porcas e parafusos; 2) as rotinas de VC definem: a captura, como a imagem será processada e quais decisões tomar com base nesse resultado; 3) devido à incompatibilidade do LabView 2017 em rodar Python de maneira nativa, desenvolveu-se um sistema paralelo às rotinas para receber, processar e classificar as imagens capturadas pelo FMS que em seguida retorna esses resultados ao LabView, gerando uma comunicação bidirecional do sistema; 4) o sistema python-LabView foi integrado por meio de uma comunicação LAN.

Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra o sistema físico, os resultados de reconhecimento da YOLOv8 e o sistema após a integração.

Figura 2. Sistema de VC do FMS. a) Sistema Físico. b) aplicação YOLOv8. c) YOLOv8 no LabView.



Como é possível observar na Figura 2a, o sistema físico do FMS e nas Figuras 2b e 2c é possível notar como funciona o reconhecimento da YOLOv8 e como aparece no subsistema de VC do FMS, respectivamente. Utilizou-se uma conexão LAN via protocolo de rede IPv4 e protocolo de comunicação TCP/IP para conectar dois computadores. Sendo um com Labview, que controla as rotinas de visão computacional e outro que, em paralelo, roda um servidor python websocket capaz de receber os dados de imagem, processar os dados com a YOLOv8 (modelo treinado) e então retornar a informação ao LabView, que toma sua decisão com base no algoritmo de VC, exibindo a informação na tela vista na Figura 2c. O modelo apresentou precisão de 90% e uma velocidade de processamento máxima de 83ms por imagem (12 FPS) que, de acordo com a demanda e das condições do atual estudo, pode-se julgar o reconhecimento acontecendo em “tempo real”. Além disso, foi capaz de reconhecer até 3 produtos em uma única imagem. Entretanto, cada problema de VC possui uma solução específica, como chave e fechadura. Escolher a melhor arquitetura e melhorar seus indicadores de desempenho (precisão, evocação, velocidade de processamento) requer testes que também incluam outras arquiteturas de CNN. Além disso, o subsistema VC-CNN está restrito apenas ao reconhecimento de produtos, outras funcionalidades para um controle e interação Humano-FMS também podem ser implementadas.

Conclusões

Conclui-se, portanto, que: O sistema de comunicação labview-python via TCP/IP via protocolo de rede IPv4 funciona adequadamente para as demandas do FMS; A arquitetura YOLOv8 foi capaz de processar as imagens em 83ms e reconhecer, em uma mesma imagem, até 3 objetos simultaneamente dentre os 44 tipos disponíveis; O sistema de VC do FMS baseado numa CNN é robusto o suficiente para reconhecer variados produtos de qualquer geometria e auxiliar na tomada de decisões de todo o sistema, como por exemplo, o destino de manipulação dos produtos. Para trabalhos futuros, deve-se determinar qual a arquitetura mais adequada para a situação do FMS.

Referências Bibliográficas

- [1] WECKENBORG, C. *et al.* Flexibility in manufacturing system design: A review of recent approaches from Operations Research. European Journal of Operational Research, in press, 2023.
- [2] ALSAKKA, F. *et al.* Computer vision applications in offsite construction. Automation in construction, v. 154, n. 104980, p. 104980, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104980>.
- [3] KHAN, S. *et al.* A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision. Cham: Springer International Publishing, 2022.

Implementação de Protocolo de Transmissão de Dados para Análise de Falhas em Sistemas Mecânicos em Aerogeradores

Maycon G. A. Lima, Deryky F. F. da Silva, Rayane D. da Cunha, Salete M. Alves*

Grupo de Estudo de Tribologia e Integridade Estrutural (GET) Departamento de Engenharia Mecânica

**maycon.lima.118@ufrn.edu.br*

Introdução

As engrenagens são componentes essenciais em sistemas mecânicos como caixas de multiplicação, e são propensas a falhas que tem impacto direto no rendimento desses sistemas. O monitoramento das condições desses elementos e o diagnóstico de possíveis falhas são vitais para manter a confiabilidade e a eficiência desses sistemas. Responsável por até 33% da inatividade do setor eólico, a integridade das engrenagens tem sido considerado fator fundamental de monitoramento e análise [1].

Temperatura e vibração são parâmetros que vêm sendo estudados para analisar o desgaste e a saúde de engrenagens e demais componentes em turbinas eólicas. A temperatura é um parâmetro que pode ser analisado de forma direta, avaliando a faixa de temperatura ideal de trabalho do equipamento e, a partir do monitoramento, é possível observar se ocorrer alguma anomalia nesse parâmetro. Já a vibração não pode ser observada de forma direta, pois os sinais de vibração abrangem uma ampla gama de respostas de dados, incluindo ruídos de fundo. Para isso, são utilizados alguns tipos de análise de dados, que tratam essas informações e fornecem uma visão mais clara da ocorrência de problemas. Como podemos ver na literatura, um dos métodos a serem utilizados para reconhecer potenciais falhas, a partir da análise de sinais de vibração, é o uso das abordagens Fast Fourier Transform (FFT) ou Envelope Spectrum [2].

Os avanços tecnológicos transformaram a forma como os sinais são adquiridos, eliminando a necessidade de equipamentos diretamente conectados ao sistema em estudo. Com a Internet das Coisas (IoT), os dados podem ser coletados e transmitidos em tempo real por meio de redes de internet, permitindo uma análise mais abrangente e acessível. Essa tecnologia possibilita a visualização e monitoramento remoto dos dados, de maneira simultânea e eficiente, mesmo a grandes distâncias do local de coleta.[3]

Metodologia

No desenvolvimento do sistema em IoT, o primeiro passo foi definir as necessidades e requisitos essenciais do projeto. Os objetivos devem especificar as metas do sistema, como monitoramento remoto de dispositivos ou automação de processos, enquanto os requisitos funcionais detalham as operações que o sistema precisa realizar, como coleta de dados e controle de dispositivos. Os requisitos não funcionais devem garantir que o sistema seja eficiente, seguro e robusto. Após a definição do objetivo, foi necessário selecionar os sensores e dispositivos adequados para atender às necessidades específicas do nosso sistema.

Com os dispositivos selecionados, o próximo passo é projetar a arquitetura do sistema IoT, que deve ser bem estruturada para garantir a comunicação eficiente entre os componentes. A arquitetura inclui a definição dos dispositivos físicos, como sensores e atuadores, protocolo de comunicação MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

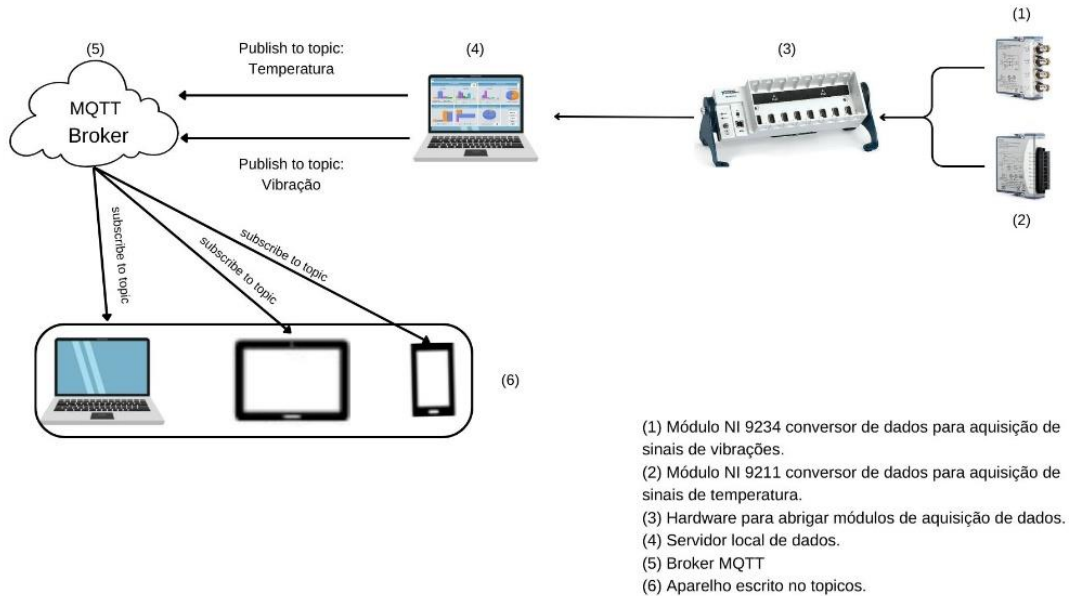
Com a arquitetura definida, a implementação da comunicação bidirecional entre os dispositivos físicos e a plataforma de gerenciamento se torna essencial. Para isso, é essencial a configuração do protocolo para garantir a transmissão de dados em tempo real, permitindo que as informações sejam enviadas dos dispositivos para a plataforma e vice-versa.

Resultados e Discussão

Na implementação do sistema IoT, foi utilizado o protocolo de comunicação MQTT, um dos mais populares para sistemas desse tipo. O sistema opera a partir de uma plataforma de aquisição de dados da National Instruments, que

coleta informações de temperatura e vibração de um protótipo de caixa de multiplicação para aerogeradores. Esses dados são então processados por um servidor local, que utiliza o protocolo MQTT para transmiti-los pela internet. O MQTT adota o modelo de comunicação publish/subscribe, permitindo a troca eficiente de dados entre os dispositivos conectados.

Figura 1 - Sistema em IoT proposto.



Fonte: Autor

A Figura 1 apresenta o sistema IoT proposto, no qual os dados de temperatura e vibração são coletados a partir dos equipamentos de aquisição da National Instruments, especificamente os módulos 9211 e 9234, responsáveis pela medição de temperatura e vibração, respectivamente. Esses dados são processados por um sistema local, que os envia via internet, publicando-os em um broker MQTT em tópicos correspondentes a temperatura e vibração. Em seguida, os dispositivos receptores se inscrevem nos tópicos correspondentes e podem acessar as informações de temperatura e vibração.

Referências Bibliográficas

- [1] DA SILVA, Rodrigo Metzger; REGO, Ronnie Rodrigo; DE FARIA, Alfredo Rocha. Integrated analysis strategy for detecting gear contact fatigue before reaching failure interruption criterion. *Journal of Sound and Vibration*, v. 595, p. 118792, 2025.
- [2] LI, Shengqing; PATNAIK, Srikanta; LI, Jianqi. IoT-based technologies for wind energy microgrids management and control. *Electronics*, v. 12, n. 7, p. 1540, 2023.
- [3] SAHA, Nitol et al. Performance evaluation framework of MQTT client libraries for IoT applications in manufacturing. *Manufacturing Letters*, v. 41, p. 1237-1245, 2024.

Avaliação de um Sistema para a Medição da Energia Consumida em Testes de Esclerometria Pendular

Nataly da Silva Batista; Anderson C. A. de Melo*

Laboratório de Manufatura, Departamento de Engenharia Mecânica

**natallybatista5@gmail.com*

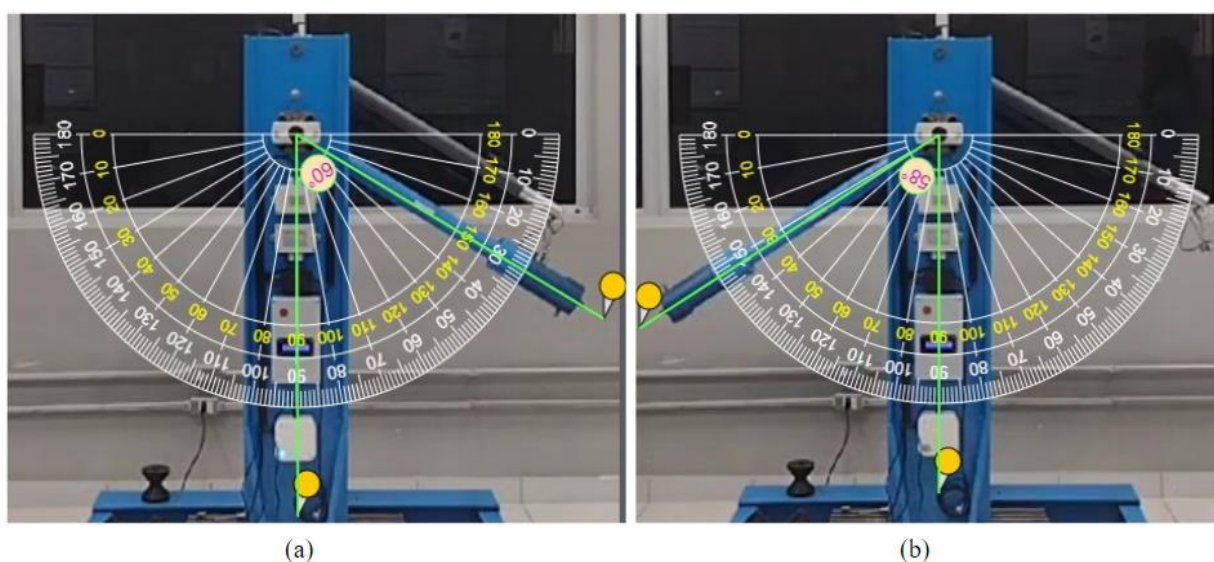
Introdução

Em meio ao avanço das tecnologias e à crescente demanda por materiais mais resistentes, a esclerometria pendular de passe único surge como uma ferramenta poderosa, permitindo a caracterização de propriedades do material riscado, tais como, sua dureza dinâmica e o coeficiente de atrito em superfícies lubrificadas. Essa técnica utiliza o movimento de um braço pendular dotado de um riscador que é fixado em sua extremidade oscilante. Quando solto de uma determinada altura, o riscador promove um único risco em forma de meia-lua na superfície da amostra. Nesse caso, a avaliação do desempenho de fluidos lubrificantes, por exemplo, pode também ser feita pela medição da energia consumida no riscamento [1]. Nesse contexto, foi desenvolvido um sistema de medição da energia consumida no riscamento de amostras diversas que foi aplicado a um esclerômetro que vem sendo desenvolvido no Laboratório de Manufatura da UFRN. O sistema é baseado em um transdutor do tipo *encoder* e na plataforma Arduino Uno. Para avaliar o sistema em questão, fez-se uma série de testes em vazio, onde a energia consumida foi medida e os resultados obtidos foram comparados com outros adquiridos por um método baseado em filmagens dos testes. Notou-se algumas diferenças entre as duas técnicas, mas não se pode afirmar com segurança que a primeira é mais adequada do que a segunda.

Metodologia

Os testes foram realizados com o pêndulo do esclerômetro tendo sido liberado de seis alturas diferentes, correspondendo a seis ângulos de partida, com cinco medições realizadas para cada posição. Nesse caso, o sistema eletrônico desenvolvido foi responsável pela medição, em tempo real, da energia consumida. Os valores obtidos foram comparados com resultados obtidos a partir de medições feitas com o uso de um aplicativo, disponível no site Online Protractor (2024), que permite a medição de ângulos [3], conforme mostra a figura 1. Cabe ressaltar que, para as duas técnicas citadas, a determinação da energia consumida é calculada com base nos ângulos de partida e final do braço pendular, conforme [2].

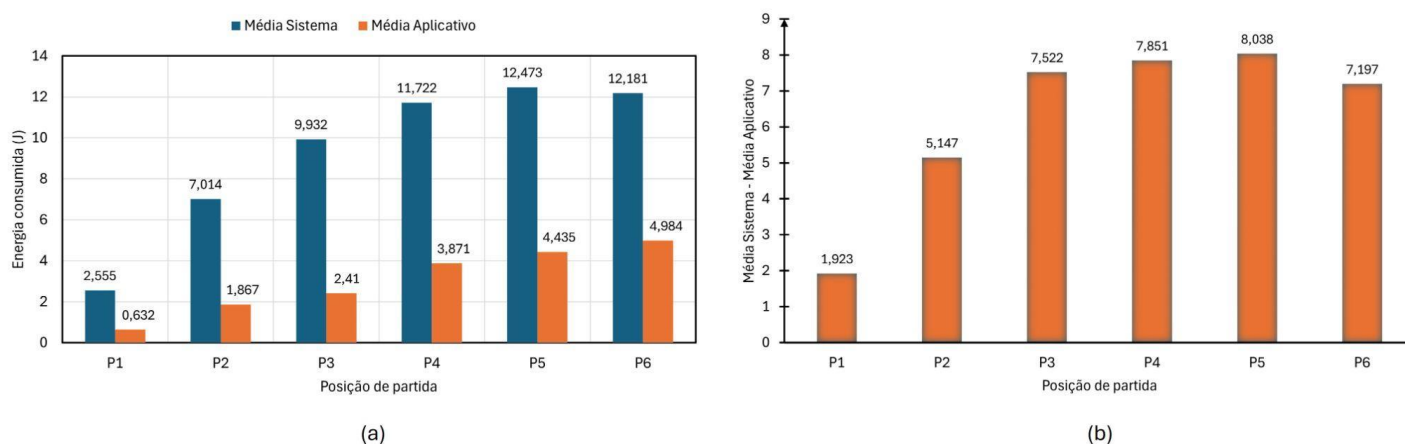
Figura 1. Medição dos ângulos de partida (a) e final (b) com o uso do aplicativo.



Resultados e Discussão

A figura 2a apresenta os valores de energia consumida obtidos através dos dois métodos usados. As posições mostradas no eixo das abscissas, referem-se às seis diferentes alturas de soltura (ref. aos ângulos de partida), sendo a Posição 1 a mais baixa e a Posição 6 a mais alta. Nota-se que, independentemente do método, o consumo de energia aumenta com o aumento da energia de partida. Observa-se ainda diferenças significativas nos valores da energia consumida obtidos pelos dois métodos, sendo que existe uma tendência de aumento e posterior estabilização em torno de 8 J com o aumento do ângulo de partida (figura 2b).

Figura 2. (a) Energia média consumida versus posição do braço pendular; (b) Diferenças entre as energias consumidas obtidas pelos dois métodos.



Embora tenham sido detectadas diferenças consideradas significativas na energia consumida pelas duas técnicas, não é possível privilegiar uma em detrimento da outra. Assim, ainda não se pode considerar o segundo método um padrão de comparação confiável, exigindo a busca por um outro meio mais adequado que possa ser utilizado para a aferição e calibração do sistema.

Conclusões

A energia consumida aumenta com o aumento da energia potencial de partida. Ocorreram diferenças significativas entre os valores de energia consumida medidos pelos dois métodos. As diferenças entre os valores de energia consumida medidos pelos dois métodos aumenta com uma tendência de estabilização em torno de 8 J com o aumento da energia potencial de partida. Não se pode privilegiar um método em detrimento do outro.

Referências Bibliográficas

- [1] CATTANEO, Mariane de Lacerda. Correlação entre os ensaios de esclerometria pendular e método charpy para aços SAE 1080. Natal, RN: 2023. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [2] Maeda, K.; Bismarck, A.; Briscoe, B. J., 2005. Mechanisms of scratching frictions and damage maps for rubber compounds. *Wear*, v.259, n.1–6, p. 651–660.
- [3] Online Protractor. Medidor de ângulos digital. Disponível em: https://www.ginifab.com/feeds/angle_measurement/online_protractor.pt-br.php.

Simulação Computacional dos Perfis Aerodinâmicos Naca com Diferentes Simetrias e Aplicação em Aerogeradores

Kécia de Lima Gabriel; William Henrique de Lima Fiúza; Sandi Itamar Schafer de Souza.*

Departamento de Engenharia Mecânica (UFRN)

**e-mail: kecia.lima.095@ufrn.edu.br*

Introdução

As pás dos aerogeradores são formadas por aerofólios, cujas características aerodinâmicas exigem uma análise detalhada de fenômenos como sustentação e arrasto. Esses fenômenos podem ser avaliados por métodos analíticos, experimentais e numéricos, sendo que o último se destaca como uma alternativa viável devido à sua eficiência e menor custo, desde que haja capacidade computacional adequada [1]. Este trabalho analisa computacionalmente os aerofólios NACA 0012 e NACA 64(3)-418 para validar dados experimentais objetivando a metodologia empregada no trabalho de FIUZA et. al (2024) [2] e compreendendo suas aplicações em aerogeradores.

O NACA 0012 é amplamente empregado em estudos devido à sua geometria simétrica, enquanto o NACA 64(3)-418, de geometria cambado, destaca-se por manter o fluxo laminar por maior extensão da superfície, logo aumentando a eficiência aerodinâmica. Essas propriedades tornam este último particularmente atraente para turbinas eólicas, onde a eficiência é essencial. O estudo busca contribuir para o avanço no design e desempenho de aerogeradores, alinhando-se a dados experimentais e técnicos disponíveis, verificando o comportamento dos perfis com relação aos ruídos aerodinâmicos.

Metodologia

Para realizar as análises, foi utilizado o software ANSYS 2023 R2 Fluent. A partir dos pontos gerados pelo Airfoil Tool, foram desenvolvidas as geometrias e malhas dos aerofólios NACA 0012 e NACA 64(3)-418, ambos com ortogonalidade mínima de 53%. As simulações consideraram ângulos de ataque de 0°, 5°, 10° e 15°, e as condições de contorno foram ajustadas conforme a Tabela 1 para garantir maior precisão nos resultados.

O método estacionário foi empregado para o NACA 0012, enquanto o transiente foi necessário para o NACA 64(3)-418 devido às diferenças no comportamento aerodinâmico. No caso do NACA 64(3)-418, a simulação estacionária apresentou limitações, já que, em baixas condições de Reynolds, o gradiente adverso de pressão causou separação precoce da camada limite e transição para fluxo turbulento. Esse fenômeno demandou a abordagem transiente para capturar com precisão a dinâmica do fluxo ao longo do tempo. Essa abordagem permitiu uma representação detalhada dos fenômenos de separação e transição do fluxo, sendo crucial para validar os resultados e compreender o comportamento específico do NACA 64(3)-418.

Tabela 1. Condições de contorno para os perfis.

Parâmetros	Fluido	Densidade (kg/m ³)	Velocidade (m/s)	Corda (m)	Reynolds	Área (m ²)	Regime	Modelo de turbulência	Número de Courant
NACA 0012	Ar	1,19	58,1	0,776	2,88*10 ⁶	1	Estacionário	kklo	-
NACA 64(3)-418	Ar	1,225	8,5	0,250	1,14*10 ⁵	0,250	Transiente	kklo	2

Resultados e Discussão

Ao simular os perfis propostos foram obtidos os valores do coeficiente de arrasto (C_d) e sustentação (C_l), os quais foram comparados com a literatura, e é notável que eles aumentam com o aumento do ângulo de ataque.

As simulações dos perfis NACA 0012 e NACA 64(3)-418 confirmaram que os coeficientes de sustentação (C_l) e arrasto (C_d) aumentam com o ângulo de ataque. Para o NACA 0012, os resultados de C_l seguiram a tendência teórica, Figura 1, indicando possível separação do fluxo próximo a 10°, enquanto os valores de C_d mostraram bom alinhamento com

a teoria, Figura 2. No caso do NACA 64(3)-418, os efeitos da turbulência influenciaram os resultados, que apresentaram pequena divergência em relação à teoria, mas mantiveram o comportamento esperado de C_l maior que C_d devido à eficiência aerodinâmica do perfil, conforme Figura 3 e 4.

Figura 1. Comparativo entre os valores de C_l teóricos e experimentais do NACA 0012.

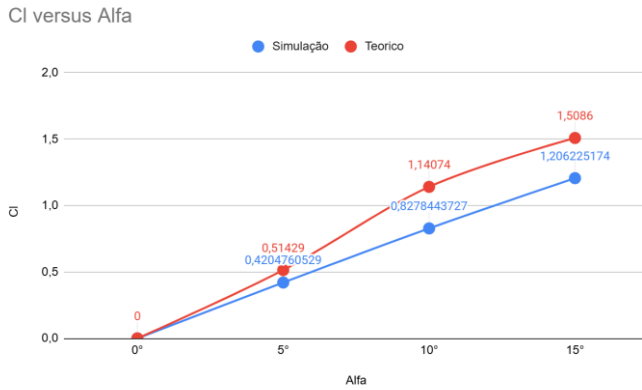


Figura 2. Comparativo entre os valores de C_d teóricos e experimentais do NACA 0012.

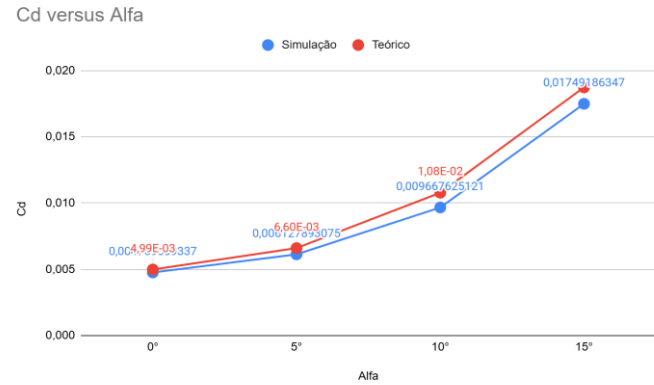


Figura 3. Comparativo entre os valores de C_l teóricos e experimentais do NACA 64(3)-418.

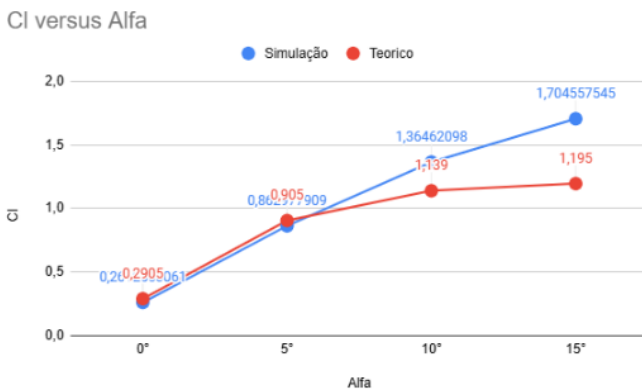
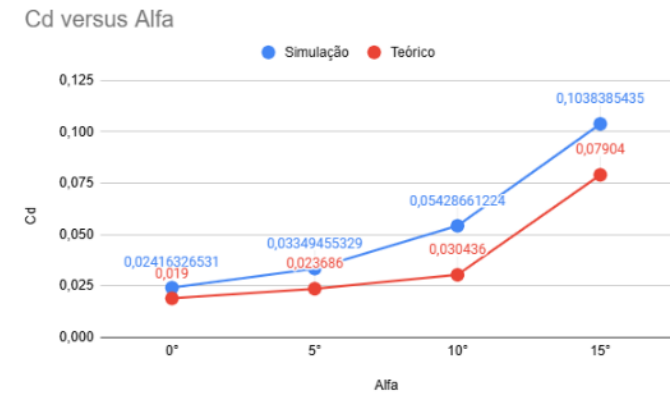


Figura 4. Comparativo entre os valores de C_d teóricos e experimentais do NACA 64(3)-418.



Conclusão

O estudo comparativo dos aerofólios NACA 0012 e NACA 64(3)-418 mostrou que as simulações numéricas no ANSYS Fluent se alinharam aos dados teóricos e experimentais, validando a metodologia. O NACA 0012 seguiu o comportamento teórico até o estol em 10° enquanto o NACA 64(3)-418 destacou-se por manter o padrão do teórico apesar de demonstrar um erro relativo mediano diante os valores comparados. O modelo transiente foi crucial para captar fenômenos no NACA 64(3)-418, evidenciando a influência da turbulência. Os resultados confirmaram o aumento de sustentação (C_l) e arrasto (C_d) com o ângulo de ataque, sendo dados essenciais para projetos de aerogeradores. O trabalho contribui para o desenvolvimento de aerofólios mais eficientes no design de turbinas eólicas.

Referências Bibliográficas

- [1] MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluídos computacionais. 2ªEd.LTC. 2017.
- [2] FIUZA, W. H. L, et al. Simulação numérica no estudo do ruído aerodinâmico presente nos perfis (pás) de aerogerador eólico. Proceedings of the XII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2024. Anais ABCM, 2024.

O Impacto do Uso de Nanopartículas na Formação de Tribofilmes: Uma Visão Sobre a Ótica da Espectroscopia Raman com Interferometria

Layna A. Alves, Salete M. Alves*

Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural (GET) – Departamento de Engenharia Mecânica

**layna.alves.128@ufrn.edu.br*

Introdução

A evolução tecnológica em sistemas tribológicos tem impulsionado a investigação de novos materiais e mecanismos capazes de reduzir o atrito e o desgaste. Santos (2024) [1] desenvolveu um biolubrificante à base de óleo de palma modificado quimicamente com nanopartículas de nanotubos de carbono e cobre, alcançando uma redução de até 55% no volume de material removido, evidenciando seu potencial para aprimorar o desempenho de sistemas mecânicos. Mariño *et al.* (2023) [2] destacam que a eficiência de veículos elétricos pode ser aumentada pela otimização do comportamento tribológico de componentes, como os fluidos de transmissão elétrica, que demandam baixa viscosidade e propriedades antidesgaste aprimoradas. Nesse contexto, o uso de nanoaditivos, como nanopartículas de óxido de silício funcionalizadas, tem mostrado resultados promissores, incluindo a redução significativa de atrito e desgaste, maior estabilidade das nanodispersões e formação de tribocamadas homogêneas. Dentre as abordagens recentes, destaca-se o uso de nanopartículas como aditivos em lubrificantes, promovendo a formação de tribofilmes com propriedades superiores às tradicionais. Este estudo revisa a literatura sobre os avanços na caracterização desses filmes, com ênfase no papel da Espectroscopia Raman associada à interferometria óptica. Pois o objetivo geral da pesquisa é investigar e compreender como o uso de nanopartículas influencia a formação e as propriedades dos tribofilmes, com foco na análise dessas mudanças explorando a aplicação da Espectroscopia Raman, associada à interferometria óptica, para caracterizar, compreender e correlacionar os mecanismos químicos e estruturais envolvidos no processo. A teoria central que orienta essa pesquisa é que as nanopartículas podem melhorar as propriedades tribológicas, como redução de atrito e aumento da resistência ao desgaste.

Metodologia

Para este trabalho, optou-se pela realização de uma revisão bibliográfica com o objetivo de reunir, organizar e analisar informações relevantes acerca do tema. As fontes foram selecionadas em bases de dados reconhecidas, como CAPES, SciELO, Google Acadêmico e ScienceDirect. Para as buscas, empregaram-se palavras-chave como Raman, espectroscopia, interferometria, tribofilmes e nanopartículas. Foram priorizadas publicações recentes, em português e inglês, publicadas entre 2010 e 2024, que contivessem todas ou a maioria das palavras-chave mencionadas. A análise de tribofilmes utilizando interferometria e Espectroscopia Raman fornece insights complementares e valiosos sobre suas propriedades estruturais e composicionais.

Resultados e Discussões

No trabalho realizado por Giacomelli (2020) [3], foi estudado o desempenho tribológico de nanopartículas de lubrificantes aplicadas a grafeno e carbono derivado de carbetos, com análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura, interferometria óptica de luz branca e Espectroscopia Raman. Esses métodos permitiram identificar os mecanismos de desgaste e lubridade atuantes, evidenciando a formação de tribocamadas de fácil cisalhamento que proporcionam alta proteção contra desgaste e redução significativa da oxidação. Nas amostras de alta lubridade, foi observado um desgaste praticamente imensurável, acompanhado de ganho de material devido ao acúmulo de materiais

lubrificantes nos vales, além de um desgaste muito suave nos contra-corpos. De forma semelhante, Rzatki *et al.* (2015) [4] investigaram o comportamento tribológico de um compósito PEEK de alto desempenho sob condições características de compressores herméticos. As análises de desgaste e rugosidade superficial foram realizadas com interferometria óptica e microscopia, enquanto a Espectroscopia Raman foi empregada para estudar filmes de transferência na superfície dos contra-corpos. Esses estudos destacam o papel dos tribofilmes na melhoria da lubrificidade e na redução do desgaste, reforçando a importância de técnicas avançadas na caracterização de materiais tribológicos.

Guo *et al.* (2010) [5] demonstram que a interferometria é uma técnica eficiente para medir a espessura de filmes lubrificantes finos, destacando, por meio de experimentos, a influência das propriedades da interface sólido/líquido no comportamento da lubrificação. Essas variações podem ser claramente identificadas com base na espessura do filme. Por outro lado, a Espectroscopia Raman se sobressai na caracterização da composição química e estrutura do material, fornecendo uma medida direta das energias dos modos normais de oscilação, intrinsecamente relacionadas às interações entre os átomos constituintes. Segundo Rodrigues *et al.* (2013) [6], o espectro Raman fornece uma medida direta das energias dos modos normais de oscilação de um meio, que, por sua vez, dependem intrinsecamente das interações entre os átomos constituintes. Alterações composicionais e estruturais, características fundamentais de tribofilmes, são facilmente detectadas por meio de modificações no espectro vibracional, evidenciando a sinergia dessas técnicas na caracterização detalhada dos tribofilmes

Conclusão

Conclui-se que a investigação sobre o uso de nanopartículas na formação e nas propriedades dos tribofilmes, realizada por meio da aplicação combinada da Espectroscopia Raman e da interferometria óptica, contribuiu significativamente para a caracterização e compreensão dos mecanismos químicos e estruturais envolvidos no processo. Os resultados obtidos corroboram a hipótese central de que as nanopartículas possuem potencial para aprimorar as propriedades tribológicas, como a redução do atrito e o aumento da resistência ao desgaste, evidenciando sua relevância no avanço de tecnologias de engenharia de superfícies

Referências Bibliográficas

- [1] SANTOS, Jamisdean Sales. Avaliação tribológica de óleo vegetal de palma com nanopartículas de cobre e nanotubos de carbono. 2024. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2024.
- [2] MARIÑO, Fátima et al. Effect of the addition of coated SiO₂ nanoparticles on the tribological behavior of a low-viscosity polyalphaolefin base oil. *Wear*, v. 530, p. 205025, 2023.
- [3] GIACOMELLI, Renan Oss. Metodologia para investigação do desempenho tribológico de nanopartículas de lubrificantes sólidos na macroescala aplicada a grafeno e carbono derivado de carbetos. 2020.
- [4] RZATKI, Felipe Darabas et al. Effect of temperature and atmosphere on the tribological behavior of a polyether ether ketone composite. *Friction*, v. 3, p. 259-265, 2015.
- [5] GUO, Feng et al. Medição por interferometria de filmes lubrificantes em contatos deslizantes no disco. *Cartas de Tribologia*, v. 39, p. 71-79, 2010.
- [6] RODRIGUES, Ariano De Giovanni; GALZERANI, José Cláudio. Espectroscopias de infravermelho, Raman e de fotoluminescência: potencialidades e complementaridades. *Revista Brasileira de ensino de Física*, v. 34, p. 4309, 2013.

Desgaste Triboquímico de Agulhas dos Bicos Injetores em Motores a Diesel Operando com Biodiesel Aditivado com Nanopartículas de Óxido de Cobre

Luiz E. G. da Costa; Salete M. Alves*

**eduardo.costa.127@ufrn.edu.br*

Introdução

Devido a tamanha relevância, foi possível observar uma ascensão no número de pesquisas que buscam aprimorar as características do biodiesel de modo a torná-lo uma alternativa economicamente viável e capaz de superar o desempenho do diesel utilizado atualmente [1]. Uma das formas mais utilizadas para atingir tais propriedades é por meio da aditivação. Nesse ínterim, entre os principais aditivos que foram utilizados estão o óxido de cobre, nanopartículas de alumina [2], nanopartículas de carbono e grafeno, óxido de silício e etc [3].

Dentre eles, devido a sua facilidade de obtenção, manuseio e a vasta quantidade de literatura que aborda as propriedades do Biodiesel aditivado com nanopartículas de óxido de cobre, aliada a escassez de estudos acerca de suas propriedades tribológicas ressaltando o desgaste dos motores à combustão após a utilização dessa mistura, é de suma importância que essa temática seja abordada para obter uma análise mais ampla dos impactos da utilização de tal aditivo [4].

Dessa forma, é imprescindível que o impacto da diferença entre as composições químicas desses dois combustíveis seja analisado e quantificado para determinar a viabilidade da sua inclusão na matriz energética brasileira. Para tal, se faz necessária uma análise criteriosa dos danos e das principais falhas ocasionadas pela substituição direta do diesel pelo biodiesel aditivado nos subsistemas do motor em contato direto com o fluido, dentre eles o sistema de injeção.

Metodologia

A metodologia proposta para este estudo tem como principal objetivo avaliar as consequências da utilização de biodiesel aditivado com nanopartículas de óxido de cobre (CuO) no desgaste triboquímico de componentes específicos do motor a diesel. A pesquisa será dividida em etapas laboratoriais e de análise dos resultados. Serão selecionados três tipos de combustível para a análise: o diesel convencional, o biodiesel convencional e o biodiesel aditivado com nanopartículas de óxido de cobre. O biodiesel será preparado com a adição de diferentes concentrações de CuO, que serão determinadas com base nas referências da literatura e na disponibilidade da mistura para realização do estudo.

Além disso, a agulha de injeção do motor a diesel será a peça escolhida para análise por se tratar de um dos pontos de maior contato com o combustível e, portanto, mais suscetível ao desgaste. Por meio da avaliação do desgaste que ocorre no componente escolhido de acordo com o combustível utilizado, por meio do uso de um motor à diesel acoplado a um dinamômetro elétrico de bancada; a um sistema de dissipação de energia; unidade de controle composta por unidade Multi-K; a um sistema de alimentação de combustível tipo tanque. Também a bancada será instrumentada com sensores como termopar, cronômetro, barômetro, um termo-higrômetro e uma câmera termográfica para controle das variáveis. As agulhas serão submetidas à operação com ambos os combustíveis (diesel e biodiesel aditivado com CuO), em diferentes períodos, para avaliar o impacto das nanopartículas de CuO no desgaste.

Será realizada uma análise tribológica detalhada para avaliar o desgaste nas amostras. Essa análise será realizada por meio dos métodos de inspeção visual e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); avaliação da lubrificidade da mistura utilizando o teste de High Frequency Reciprocating Ring (HFRR), caracterização química da superfície utilizando uma Espectroscopia de Energia Dispersiva (EED) e Espectroscopia RAMAN; e, uma caracterização de dureza por microidentação.

Resultados e Discussão

De acordo com Madiwale *et al.*, (2017) [5] para reduzir os impactos gerados pela diferença das propriedades químicas e físicas desse combustível a aditivação tem se mostrado uma das melhores alternativas para aprimorar as características desejáveis e diminuir as não desejáveis. Nesse sentido, a aditivação por meio de nanopartículas, principalmente de óxidos metálicos, têm sido amplamente estudadas, dentre elas as de óxido de cobre (CuO) por sua capacidade de elevar o desempenho do combustível [6] e reduzir as emissões de gases que contribuem para o efeito estufa [7]. A literatura ainda carece de uma compreensão aprofundada dos efeitos do CuO no desgaste de materiais de motores, especialmente em condições de operação prolongada.

Embora a literatura ofereça um amplo corpo de pesquisa sobre o uso de biodiesel e nanopartículas de CuO tais como os estudos realizados por Kalaimurugan *et al.*, (2019) [8] que observou os efeitos da aditivação em misturas diesel-biodiesel no desempenho do motor, poucos estudos abordam o impacto direto da aditivação do biodiesel com nanopartículas de CuO no desgaste triboquímico de componentes críticos de motores, como os injetores e o sistema de injeção. Além disso, ainda há uma lacuna na avaliação dos danos causados pelas interações triboquímicas entre o biodiesel aditivado com nanopartículas CuO e os materiais usados nos componentes do motor, o que justifica a importância desta pesquisa [4].

Sendo assim, para esse estudo esperam-se resultados semelhantes aos que foram encontrados por Aitavade e Kamate, (2021) [9] que ao analisar através de um tribômetro de 4 esferas diversas misturas de diesel-biodiesel com concentrações diferentes de nanopartículas de óxido de cobre, foi possível observar a diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da viscosidade da mistura ao elevar a proporção do aditivo, de modo semelhante foi possível elevar a viscosidade ao adicionar a nanopartícula diretamente ao bio-óleo [10]. Contribuindo, dessa forma, para a análise dos biocombustíveis como alternativa ao diesel utilizado comercialmente na contemporaneidade.

Referências Bibliográficas

- [1] ABREU, F. R. et al. New multi-phase catalytic systems based on tin compounds active for vegetable oil transesterification reaction. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, v. 227, n. 1-2, p. 263-267, 2005. ISSN 13811169.
- [2] SHAAFI T.; VELRAJ R. Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: combustion, engine performance and emissions. *Renewable Energy*, v. 80, p. 655-663, 2015.
- [3] KUMAR S.; DINESHA P.; BRAN I. Experimental investigation of the effects of nanoparticles as an additive in diesel and biodiesel fuelled engines: a review. *Biofuels*, v. 10, p. 615-622, 2019.
- [4] BITIRE S. O.; NWANNA E. N.; JEN T. The impact of CuO nanoparticles as fuel additives in biodiesel-blend fuelled diesel engine: A review. *Energy & Environment*, v. 34, p. 2259-2289, 2023.
- [5] MADIWALE, S.; KARTHIKEYAN A.; BHOJWANI V. A comprehensive review of effect of biodiesel additives on properties, performance, and emission. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 197, 2017.
- [6] GUMUS, S.; OZCAN, H.; OZBEY, M.; TOPAGALU, B. Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine. *Fuel*, v. 163, p. 80-87, 2016.
- [7] AGBULUT, U.; GUREL, A. E.; SARIDEMIR, S. Experimental investigation and prediction of performance and emission responses of a CI engine fuelled with different metal-oxide based nanoparticles-diesel blends using different machine learning algorithms. *Energy*, v. 215, 119076, 2021.
- [8] KALAIMURUGAN, K *et al.* Experimental studies on the influence of copper oxide nanoparticle on biodiesel-diesel fuel blend in CI engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 45, p. 8997-9012, 2023.
- [9] AITAVADE, E.; KAMATE, S. Experimental Investigation of Tribological Characteristics of Blends of SGME Modified With Copper Oxide Nanoadditivation. *Trends in Sciences*, v. 19, p. 3047, 2021.
- [10] LEPSHA, P. T.; Ghosh, P. Influence of CuO Nanoparticles on the Tribological Performance of Karanja Oil (*Pongamia pinnata*). *ChemistrySelect*, v. 9, p. 202403581, 2024.

Simulação Numérica do Potencial Eólico Offshore no Rio Grande do Norte

Vinicius W. R. Silva; Gabriel I. M. Tapia*

Laboratório de sistemas térmicos e energias alternativas

**vinicius.wallace.silva.706@ufrn.edu.br*

Introdução

A expansão do consumo energético é impulsionada pelo aumento populacional e pelo desenvolvimento econômico, sendo esse um dos maiores desafios enfrentados por vários países, ao mesmo tempo que se cresce a necessidade de controlar as agressões ambientais, responsáveis pelo agravamento das mudanças climáticas. Por ser uma fonte de energia sustentável e amplamente acessível, a energia eólica destaca-se como um dos recursos em ascensão no mercado. Segundo a associação brasileira de energia eólica (ABEEólica) [1], ao longo do ano de 2023 foram gerados 98,55 TWh de energia eólica em todo o Brasil, onde o subsistema da região do nordeste registou uma geração total de 83,52 TWh, contabilizando 92% de toda a energia eólica gerada no Brasil. Toda a geração de eletricidade a partir das fontes eólicas é proveniente apenas de usinas onshore, ainda não havendo usinas offshore em operação.

A EPE (2020) [2] e [3] estima que para ventos acima de 7m/s, em áreas marítimas com profundidade de até 50m, e alturas de 100m, o potencial eólico no Nordeste é de 356 GW e uma produção energética de 1.436TWh, esta produção representa 2,82 vezes o consumo anual de eletricidade no Brasil em 2022, que foi de 509TWh. Observa-se que existe um alto potencial energético encontrado em águas relativamente rasas na região nordeste do Brasil ainda não explorado. Há estudos que exploram a viabilidade técnico-econômica de usinas offshore no estado do Rio Grande do Norte, como o realizado por Nunes (2020) [4], que teve como objetivo estimar a produção energética e os custos envolvidos. Além disso, Maciel (2023) [5] desenvolveu métodos para a caracterização dos ventos costeiros e offshore por meio de simulações numéricas em mesoescala no litoral nordestino. Essas pesquisas evidenciam a necessidade de estudar o alto potencial energético eólico offshore disponível na região Nordeste, bem como a viabilidade de sua implantação. Inspirado por esses trabalhos, o presente projeto de pesquisa tem como objetivo realizar simulações numéricas para compreender o comportamento dos ventos onshore e offshore no Rio Grande do Norte, além de identificar as áreas mais promissoras para a implementação de projetos com maior capacidade de geração de energética.

Metodologia

O referido trabalho envolve várias etapas estruturadas para garantir a análise e determinação do potencial energético dos ventos no estado do Rio Grande do Norte. Inicialmente, será realizada uma revisão de literatura com o objetivo de construir uma fundamentação teórica sobre as tecnologias utilizadas para analisar o potencial energético tanto onshore quanto offshore em regiões onde sua aplicação já foi comprovada. Essa etapa fornecerá informações relevantes para orientar a escolha de metodologias e ferramentas aplicadas ao contexto do Rio Grande do Norte. Em seguida, os dados utilizados serão obtidos de bases de coleta já validadas, contendo medições confiáveis de velocidade e direção dos ventos. Posteriormente, será realizado o pré-processamento dos dados, que incluem etapas como o tratamento de valores ausentes ou discrepantes, uniformização das unidades de medida e organização dos dados em formatos adequados para análise.

Resultados e Discussão

De acordo com os estudos realizados por Nunes (2020) [4], a velocidade média anual do vento offshore no Rio Grande do Norte, em 2019, foi de 10,81 m/s a uma altura de 100 metros. Os meses de agosto e setembro se destacaram, registrando médias de 12,48 m/s e 12,37 m/s, respectivamente. Já os meses de março e abril apresentaram médias inferiores, de 9,32 m/s e 9,39 m/s, mas que ainda representam valores significativos aos quais ainda assim podem trazer

excelentes resultados energético. Partindo desse princípio, o presente trabalho tem como objetivo realizar simulações e comparar bases de dados costeiras e offshore previamente existentes, tomando como base estudos que validam o alto potencial eólico marítimo do Rio Grande do Norte.

Conclusões

A utilização dos recursos eólicos offshore exige a compreensão total do vento em áreas com alto potencial para o desenvolvimento de parques eólicos. O ambiente marítimo apresenta vantagens significativas por possuir um elevado potencial eólico sobre a suas superfícies, bem como uma vasta extensão desobstruída, possibilitando a implantação de grandes parques eólicos em larga escala. Mediante ao levantamento bibliográfico sobre o elevado potencial energético na região costeira e offshore, destaca-se a necessidade de análises numéricas detalhadas para caracterização os ventos no estado do Rio Grande do Norte. Tal abordagem é essencial para explorar ao máximo esse vasto potencial energético disponível.

Referências Bibliográficas

- [1] ABEEÓLICA. Boletim Anual de Geração Eólica 2023. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf>.
- [2] EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). Balanço Energético Nacional 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- [3] EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). Ministério de Minas e Energia. Roadmap Eólica Offshore Brasil: Perspectivas e Caminhos para a Energia Eólica Marítima. Brasília: EPE, 2020. P. 15-18. Número: NT-EPE-PR-001/2020-r2. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- [4] NUNES, J. Energia eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em engenharia de produção) - Universidade do Federal do Rio Grande do norte. Natal, p. 219. 2020.
- [5] MACIEL, J. Caracterização do vento costeiro e offshore através de simulação numérica de mesoescala utilizando o modelo WRF e observações de LiDAR em um parque eólico no litoral do nordeste brasileiro. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Engenharia mecânica. Santa Catarina, p. 113. 2023.

Desenvolvimento e Montagem de um Sistema de Transmissão de Potência para um Veículo Leve Híbrido

**Maria E. M. de Almeida; Anderson C. A. de Melo*

Laboratório de Manufatura, Departamento de Eng. Mecânica

**maria.melo.120@ufrn.edu.br*

Introdução

Diante da crescente preocupação com os impactos ambientais que têm se intensificado ao longo do tempo, torna-se essencial investigar soluções eficazes para conter os danos causados ao meio ambiente e reduzir os efeitos do aquecimento global. De acordo com o Sistema de Estimativa de Emissões de Gases (SEEG), o Brasil se mantém na parte superior da tabela entre os maiores emissores do planeta. O país é o sétimo maior emissor de gases de efeito estufa do mundo, com 3% do total mundial [1]. Nesse cenário, considerando que a mobilidade é um dos principais responsáveis pela emissão de carbono na atmosfera, a aceitação de alternativas de transporte sustentáveis surge como uma estratégia importante para diminuir tais impactos. Veículos elétricos, como as bicicletas elétricas, já são amplamente utilizados, e uma variação recente desse modelo, denominada "e-bike car", tem ganhado destaque. Esses veículos leves, equipados com motores elétricos e, em alguns casos, a capacidade de recarregar suas baterias por meio de energia solar, atendem às exigências de mobilidade sustentável. Segundo Adhisuwignjo [2], a utilização de energia solar para o carregamento de bicicletas elétricas pode ser um fator determinante para o aprimoramento dos futuros sistemas de compartilhamento de bicicletas. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo dar uma contribuição para o desenvolvimento de um Veículo Leve Híbrido (VLH) que vem sendo construído no Laboratório de Manufatura da UFRN, com ênfase em seu sistema de transmissão de potência n , composto pelos componentes responsáveis pela transferência da potência dos pedais para a roda traseira do veículo.

Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, está-se realizando uma revisão bibliográfica que permitirá compreender o que já foi estudado e desenvolvido sobre o tema, identificando os principais modelos de Sistema de transmissão de potência de veículos semelhantes. Após essa etapa, será feito um esboço do projeto conceitual considerando as demandas necessárias ao adequado funcionamento do sistema. Na sequência, será feita a modelagem do sistema em CAD utilizando o *software* Creo Parametric Versão 8.0.2, considerando o desenho do conjunto do chassi e de outros componentes que já está pronto. Após as possíveis adequações no projeto, será iniciada a fabricação, montagem e ajustes do sistema. Para isso, serão utilizados componentes adquiridos no mercado já prontos, tais como passadores de marcha, catracas, pedivelas, pedais, roda traseira com motor elétrico acoplado, etc. Ademais, alguns componentes tubulares em alumínio deverão ser cortados e soldados à estrutura já existente.

Resultados e Discussão

Durante o período de estudo, além de um bom avanço na revisão de literatura, foi possível desenvolver a fabricação parcial de um suporte para facilitar a montagem dos diversos componentes do veículo ao seu chassi. As figuras 1 e 2 dão uma ideia do suporte que foi pensado e que está sendo fabricado no Laboratório de Manufatura.

Figura 1: Peças individuais do suporte que está sendo fabricado.

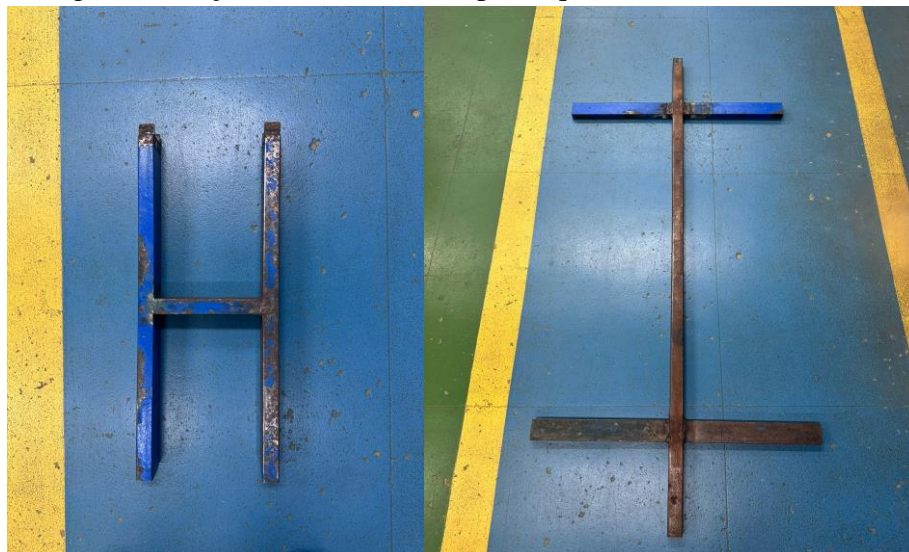


Figura 2: Conjunto do suporte montado e chassi do veículo sobre ele.



Conclusões

Pode-se concluir que, até o presente momento, o trabalho proposto segue em ritmo adequado e de acordo com o cronograma apresentado, tendo-se avançado na revisão de literatura, nas discussões acerca do projeto conceitual do sistema que está sendo apontado e na construção do suporte que auxiliará na montagem dos diversos componentes do veículo.

Referências Bibliográficas

- [1] SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES (SEEG). SEEG: 10 anos. 2023. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/SEEG-10-anos-v5.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- [2] ADHISUWIGNJO, S.; SIRADJUDDIN, I.; RIFA'I, M.; PUTRI, R. I. Desenvolvimento de uma bicicleta elétrica movida a energia solar em sistema de transporte de compartilhamento de bicicletas. 2017. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 70, n. 1, p. 012025. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/70/1/012025>. Acesso em: 13 jan.2025.

*Cinética de Adsorção de Fenol e Fenantreno por Argilas Organofílicas
Matheus H. P. Souza*; Rayanne M. A. Viegas; Osvaldo Chivovone-Filho*

Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás – Departamento de Engenharia Química (UFRN)

**email: matheushenrps@gmail.com*

Introdução

A contaminação de corpos hídricos por resíduos da indústria petrolífera representa um grave problema ambiental, dada a grande diversidade de contaminantes nesses resíduos, derivados de uma extensa combinação de compostos orgânicos e inorgânicos presentes nas misturas de petróleo e gás [1]. Grande parte desses contaminantes, sobretudo os pertencentes aos compostos fenólicos, aos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), ao grupo BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) e aos ácidos naftênicos, agravam este problema por apresentarem toxicidade e propriedades carcinogênicas e mutagênicas [2]. Além disso, o alto nível de recalcitrância destes poluentes dificulta a sua remoção no tratamento da água contaminada através de métodos convencionais [3, 4].

Dentre as técnicas avançadas de tratamento, a adsorção por meio de argilas organofílicas - obtidas pela modificação da argila natural e surfactantes catiônicos é uma alternativa econômica e eficiente na remoção de uma ampla gama de poluentes orgânicos [5, 6]. Além das argilas organofílicas, zeólitas e carvão ativado são comumente utilizados como adsorventes nesses processos. A avaliação da eficiência dos adsorventes pode ser feita a partir de ensaios de adsorção em batelada, onde se estima principalmente, a capacidade adsorptiva do material, cinética de adsorção, isotermas de adsorção e as melhores condições experimentais (temperatura, pH, dosagem do adsorvente etc.).

Dessa forma, o seguinte trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de duas argilas organofílicas distintas em soluções aquosas: a argila comercial *Spectrogel® tipo-C*, cedida pela empresa *SpectroChem Company*, de Joinville/SC, e a argila HD-100, sintetizada em laboratório pela modificação da bentonita natural com o surfactante hexadeciltrimetilamônio (HDTMA). Para tal, os contaminantes selecionados para este estudo foram o fenol e o fenantreno, sendo avaliada a cinética de adsorção para cada um deles.

Metodologia

Os experimentos de adsorção em batelada para o estudo cinético foram realizados em uma incubadora *shaker*, à temperatura de 35 °C, a 150 rpm de agitação, mantendo contato íntimo constante entre as argilas e as soluções de contaminante, por diferentes intervalos de tempo. As concentrações iniciais das soluções foram de 82 mg L⁻¹ para o fenol, e 10 mg L⁻¹ para o fenantreno. Para os ensaios, foram utilizados erlenmeyers com volume de 20 mL da solução dos contaminantes e 50 mg das argilas, vedando-os com *Parafilm M®*. As amostras pós adsorção foram obtidas após a recuperação do sobrenadante por centrifugação, seguida de filtração (PTFE, 0,45 µm) com seringas. As soluções e suas amostras foram quantificadas por espectrofotometria no ultravioleta-visível (UV-Vis), nos comprimentos de onda de 270 e 250 nm para o fenol e o fenantreno, respectivamente. Os modelos cinéticos avaliados foram os de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, sendo o ajuste dos dados experimentais, aos modelos cinéticos, realizado via função *curve fitting* (MATLAB R2024a).

Resultados e Discussão

Os resultados dos experimentos de adsorção demonstraram resultados semelhantes para a capacidade de adsorção e percentual de remoção de ambas as argilas e contaminantes, respectivamente. Para o fenol, as duas argilas alcançaram uma remoção relativamente baixa, de cerca de 21% do contaminante (no equilíbrio), apresentando um melhor ajuste ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem (PSO). Já para o fenantreno, observou-se uma maior remoção do contaminante para ambas as argilas, de cerca de 86% do contaminante (no equilíbrio), sendo que o melhor ajuste foi ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem (PPO) (Figuras 2 e 3). Consequentemente, foi observada uma maior

capacidade de adsorção das argilas para o fenantreno.

Figura 1 - Ajuste dos dados cinéticos de adsorção de fenol aos modelos de (a) PPO e (b) PSO.

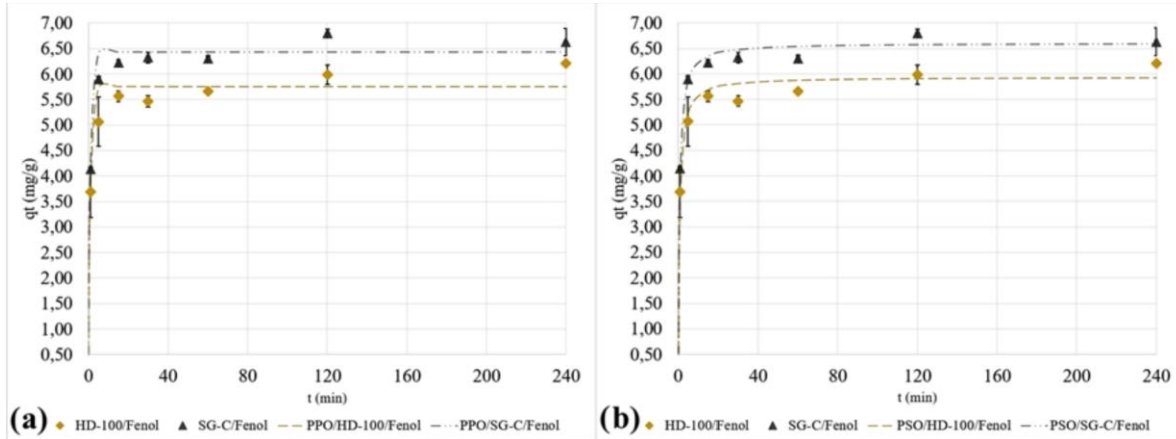
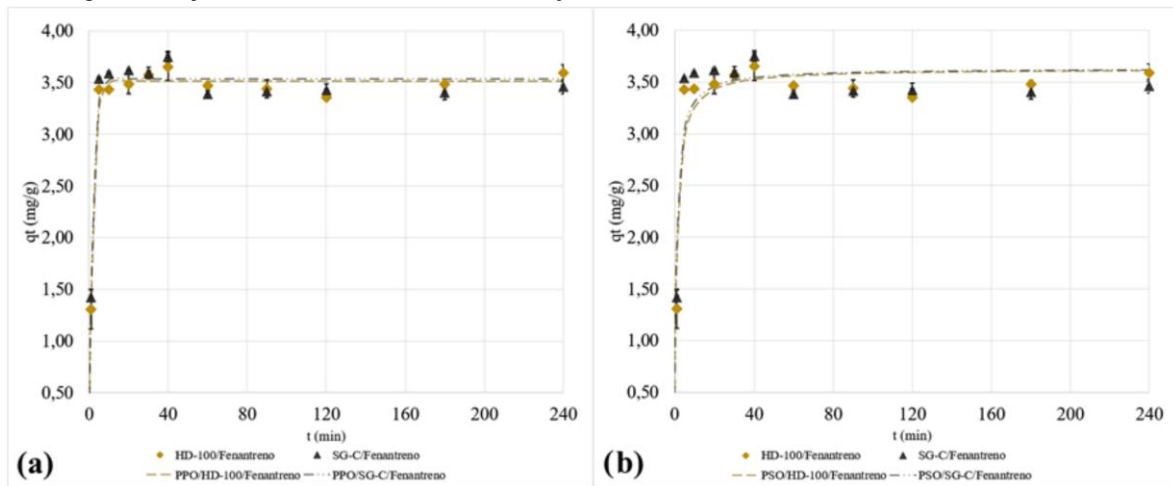


Figura 2 - Ajuste dos dados cinéticos de adsorção de fenantreno aos modelos de (a) PPO e (b) PSO.



Referências Bibliográficas

- [1] OSSANI, Innocent Chukwunonso et al. Environmental Technology & Innovation, [S.L.], v. 17, p. 100526, fev. 2020. Elsevier BV.
- [2] COSTA, Sabryna I.G. et al. Process Safety And Environmental Protection, [S.L.], v. 174, p. 608-626, jun. 2023. Elsevier BV.
- [3] JUDD, S. et al. Separation And Purification Technology, [S.L.], v. 134, p. 241-246, set. 2014. Elsevier BV.
- [4] YU, Bian et al. Chemical Engineering Journal, [S.L.], v. 435, p. 134825, 1 maio 2022. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2022.134825>.
- [5] SPERIDIÃO, D.D.C.A. et al. Materials Science Forum, [S.L.], v. 798-799, p. 558-563, jun. 2014. Trans Tech Publications, Ltd.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.558>.
- [6] LTIFI, Ismail et al. Applied Water Science, [S.L.], v. 8, n. 3, 30 maio 2018. Springer Science and Business Media LLC.

Desenvolvimento de Metodologias para o Pré-Tratamento da Água Produzida de Petróleo: Coagulação e Floculação como Etapas Iniciais do Processo

Giovanna X. F. de Souza*; ***Joyce A. B. de Souza***; ***Oswaldo Chiavone-Filho***; ***Amilcar M. Junior***
Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás (NUPEG), Laboratório de Fotoquímica e Equilíbrio de Fases (FOTEQ), Departamento de Engenharia Química (DEQ-UFRN)
****giovannaxfsouza@gmail.com***

Introdução

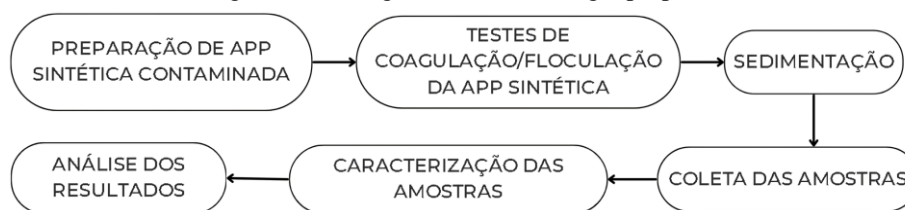
A água produzida de petróleo (APP) é aquela que está associada ao petróleo durante a sua extração de poços *onshore* ou *offshore* [1]. A APP é o maior subproduto gerado pela indústria petrolífera, superando até mesmo o volume da própria produção de petróleo. À medida que o poço de petróleo envelhece, a quantidade de petróleo e gás diminui, enquanto a de água aumenta [2]. A água doce, recurso limitado e essencial à vida dos seres vivos, representa apenas 2,5% do total do planeta, com grande parte inacessível, por estar concentrada nas geleiras [3]. Dito isso, o uso eficiente e sustentável da água deve ser pensado para garantir que as futuras gerações também tenham acesso a esse recurso. Assim, a reutilização da APP em aplicações específicas como irrigação, reinjeção em poços petrolíferos, entre outros, é necessária a fim de evitar o uso da água doce para estes fins. A APP descartada no meio ambiente, geralmente não passa por um tratamento adequado, o que pode ocasionar a contaminação do solo, dos corpos d'água e dos ecossistemas, já que ela possui uma ampla gama de contaminantes prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. A APP é constituída por óleos e graxas (O&G) dispersos, sais dissolvidos, sólidos totais dissolvidos (TDS), compostos orgânicos e inorgânicos, metais pesados, BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno), bactérias, sulfatos, fenóis, entre outros [4]. Alguns desses compostos são altamente tóxicos, carcinogênicos e mutagênicos. Por isso, a remoção desses contaminantes é essencial, pois melhora a qualidade da água para descarte ou reuso e reduz impactos ambientais e riscos associados à saúde humana e dos seres vivos. A coagulação química, técnica comumente utilizada no tratamento da APP, se baseia na adição de produtos químicos que precipitam os componentes dissolvidos e suspensos da água. Esse método gera grandes quantidades de resíduos químicos [5]. Mas, apesar disso, ela é capaz de remover grande parte dos componentes presentes na água. Os coagulantes/floculantes químicos mais utilizados são: i) coagulantes metálicos; ii) floculantes poliméricos sintéticos orgânicos e iii) floculantes poliméricos naturais. Os coagulantes metálicos e os floculantes poliméricos sintéticos orgânicos, apesar de serem eficientes no tratamento da APP, causam poluição adicional (resíduos químicos). A fim de evitar isso, podem ser utilizados os floculantes poliméricos naturais, pois estes são biodegradáveis, têm alta eficiência e baixo custo [6]. Os coagulantes metálicos à base de alumínio e ferro são os mais populares devido à sua eficácia, pronta disponibilidade e baixo custo [7, 8]. Combinações de técnicas de tratamento de APP podem ser utilizadas para potencializar a sua purificação, como, por exemplo, juntar o processo de coagulação/floculação com uma filtração por membrana ou ozonização. Este trabalho tem como objetivo utilizar aditivos doados pela empresa Syensqo e comparar sua eficiência no tratamento da APP em relação aos coagulantes/floculantes convencionais e encontrar a melhor condição experimental para aumentar a eficiência do processo, visando uma água tratada aplicável para reutilização.

Metodologia

Este estudo irá seguir um cronograma estruturado com as seguintes etapas: i) revisão bibliográfica: levantamento de informações nos tópicos principais relacionados ao trabalho; ii) preparação de APP sintética contaminada de acordo com os principais componentes reais da APP das bacias do Rio Grande do Norte, Brasil; iii) experimentos de coagulação/floculação da APP sintética: avaliação de desempenho dos aditivos concedidos pela Syensqo em relação aos coagulantes/floculantes convencionais, variando a concentração inicial de óleo, pH, temperatura e dosagem de coagulante/floculante, a fim de identificar as melhores condições para um tratamento adequado da APP sintética; iv)

caracterização e análise da água após tratamento; v) análise dos resultados. A Figura 1 apresenta o passo a passo da metodologia proposta. A análise bibliográfica possibilita fundamentar a escolha de tecnologias de tratamento da APP, como coagulação química e eletrocoagulação, avaliando suas vantagens e limitações. Espera-se, com isso, estabelecer as bases para a aplicação prática de métodos híbridos que combinem eficiência operacional com sustentabilidade. Após o processo de coagulação/floculação, a APP tratada passará pelos seguintes processos: filtração por membrana e nanobolhas de ozônio combinadas com zeólitas impregnadas com óxidos metálicos, onde, após cada um dos processos citados, serão feitas análises dos parâmetros da água tratada (teor de óleos e graxas, turbidez, metais pesados e fenol), comparando com a regulamentação brasileira, a fim de acompanhar a eficiência do tratamento da APP e analisar a possibilidade de reutilização dessa água.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia proposta.



Resultados e Discussão

Os resultados esperados incluem a análise dos seguintes parâmetros: concentração inicial de óleo, pH, temperatura e dosagem de coagulante/floculante. Essa análise permitirá uma comparação detalhada entre os aditivos da Syensqo e os coagulantes/floculantes convencionais, além de definir as condições ideais para maximizar seu desempenho. Além disso, os resultados também incluem dados sobre o teor de óleos e graxas, turbidez, metais pesados e fenol da água tratada, a fim de analisar a viabilidade da reutilização dessa água. A partir dessa análise inicial, será possível identificar potenciais limitações nos métodos convencionais de tratamento de APP e propor alternativas ou combinações que aumentem a eficiência do processo. Esses resultados iniciais são fundamentais para direcionar as próximas etapas do projeto, pois eles permitirão avançar na direção de soluções práticas e sustentáveis para o tratamento da APP, visando sua reutilização e um menor impacto ambiental.

Referências Bibliográficas

- [1] AL-GHOUTI, Mohammad A. *et al.*, Produced water characteristics, treatment and reuse: A review, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 28, 2019, Pages 222-239, ISSN 2214-7144.
- [2] LEITE, David M. Estudo do balanço quantitativo da água produzida em campos terrestres de petróleo no Brasil, 102 f, Dissertação (Direito) - UNIFACS, Salvador, 2020, <https://tede.unifacs.br/tede/handle/tede/802>.
- [3] MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>.
- [4] VEIL, John A. *et al.*, A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane, 2004.
- [5] SHAMAEI, Laleh *et al.*, Treatment of oil sands produced water using combined electrocoagulation and chemical coagulation techniques, *Science of The Total Environment*, Volume 645, 2018, Pages 560-572, ISSN 0048-9697.
- [6] ZHAO, Chuanliang *et al.*, Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review, *Science of The Total Environment*, Volume 765, 2021, 142795, ISSN 0048-9697.
- [7] MANSOUR, Mona S.M. *et al.*, Petroleum wastewater: Environmental protection, treatment, and safe reuse: An overview, *Journal of Environmental Management*, Volume 351, 2024, 119827, ISSN 0301-4797.
- [8] DAS, Namita *et al.*, Application of Different Coagulants and Cost Evaluation for the Treatment of Oil and Gas Produced Water, *Water*, 2023, 15, 464.

Síntese de Diesel Verde a Partir da Desoxigenação de Óleos Vegetais

*Johnny Newton de Souza**; *João Brandão Junior*; *Humberto N.M. de Oliveira*; *Oswaldo Chiavone-Filho*
Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás – NUPEG / Departamento de Engenharia Química - DEQ

**johnny.newton.souza.608@ufrn.edu.br*

Introdução

A crescente demanda por energia sustentável impulsiona a pesquisa em tecnologias de produção, destacando o diesel verde, ou *green diesel*, como uma alternativa promissora. O diesel verde é produzido por métodos de desoxigenação, utilizando reagentes inertes e catalisadores metálicos [1], enquanto o biodiesel convencional é gerado por transesterificação, que envolve reagentes tóxicos. As principais abordagens para a produção de diesel verde incluem: descarboxilação (DCX), descarbonilação (DCN) e hidrogenação (HDO) [2].

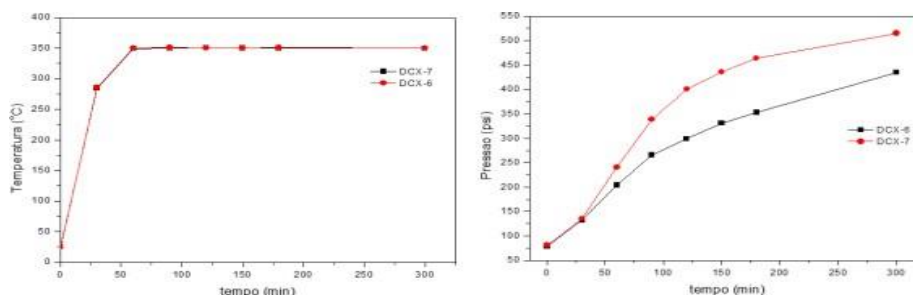
Metodologia

Revisamos a literatura sobre a quantidade de níquel (Ni) e molibdênio (Mo) utilizados em catalisadores. Identificada a faixa de uso de 5% de Ni e 15% de Mo. Para obtenção dos metais utilizamos os seguintes sais: nitrato de níquel(II) hexahidratado e heptamolibdato de amônio tetra hidratado. As massas de 2,4775 g e 2,7554 g, devem ser usadas, respectivamente. Para produção do catalisador, dissolvem-se as massas calculadas dos sais, em aproximadamente 20 mL de água destilada. Misturam-se com 10 g do suporte [1, 3 e 4]. Aquecer e agitar a mistura a 80°C até evaporar todo o líquido, formando uma pasta uniforme. Na etapa de calcinação, transfere-se a pasta para um cadinho e aquece-se a 500°C, por 3 horas na mufla. Após esta etapa, macerar e armazenar. Já no reator parr utiliza-se uma relação de 20 mL de ácido oléico para 1 g de catalisador. Adiciona-se o fluido e o catalisador ao reator e isola-se com parafusos. Injetar gás inerte (nitrogênio) por 5 minutos para a purga da atmosfera presente, e pausar o sistema com gás ainda na câmara. Aquecer, agitar e resfriar as juntas do sistema, mantendo a pressão e temperatura controladas. Retirar amostras a cada 30 minutos para análises. Resfriar o reator por completo. Etiquetar e armazenar as amostras para análise posterior. Realizar análises para determinar a eficiência do catalisador e a qualidade do produto final[1, 3 e 4].

Resultados e Discussão

Os experimentos preliminares realizados até ao momento já apresentam resultados promissores e assertivos sobre nossos estudos. A figura 1 apresenta dois exemplos de bateladas realizadas, experimentos DCX-6 e DCX-7. A batelada DCX-6 e DCX-7 foi carregada com 100 mL de ácido oleico (AO) [1, 3 e 4], para DCX-6 usamos o catalisador CAT-7 (NiMo/Al₂O₃) e para DCX-7 usamos CAT-5 (NiMo/CA), produzido em nosso laboratório [2, 4]. Os metais foram suportados com carvão ativado (CA) e alumina, a fim de analisar sua funcionalidade e aplicabilidade. Chegou-se à seguinte conclusão: a variação da temperatura nas bateladas DCX-6 e DCX-7 foi similar. No entanto, a pressão na batelada DCX-7 aumentou mais do que na DCX-6, devido à maior produção de gases no meio reacional, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1. Análise das variáveis *T* e *P* das reações com o tempo: DCX-6 (CAT-7 - NiMo/Al₂O₃) e DCX-7 (CAT-5 - NiMo/CA).



Os gases gerados durante as reações foram removidos do reator e direcionados para um kitassato contendo uma solução

alcalina com gotas de fenolftaleína. Em ambas as bateladas (DCX-6 e DCX-7), foi observada uma titulação: a solução mudou de rosa para incolor, indicando acidificação. Esse fenômeno ocorreu devido à liberação de CO₂ durante a reação, confirmando a descarboxilação do ácido oleico.

Figura 2. Análise CG/MS da corrida com DCX-6 (CAT-7 - NiMo/Al₂O₃) via consumo do ácido oleico.

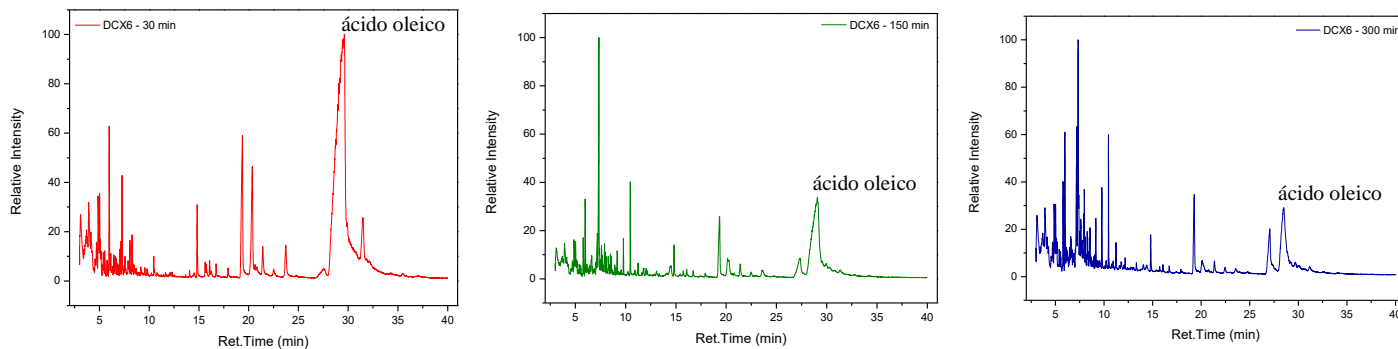
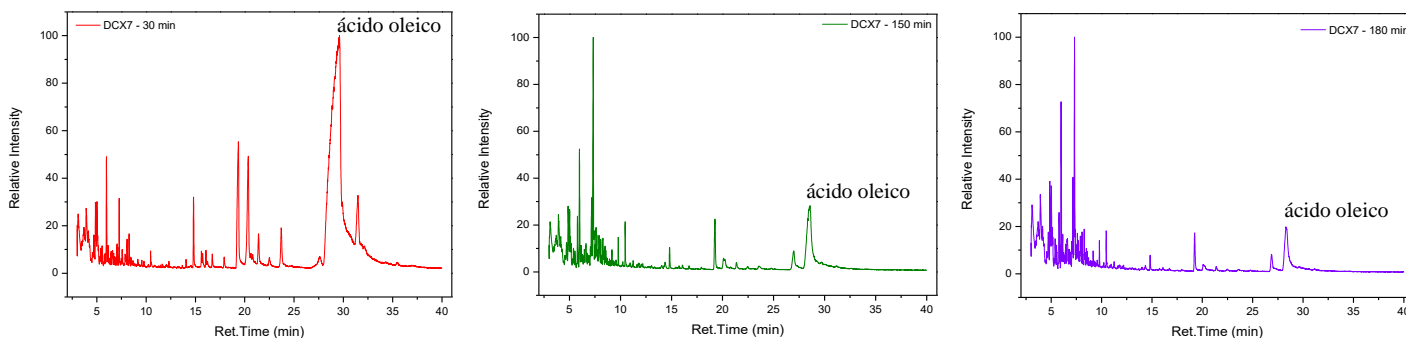


Figura 3. Análise CG/MS da corrida com DCX-7 (CAT-5 -NiMo/CA), via consumo do ácido oleico.



A análise dos cromatogramas das figuras 2 e 3, mostra que o ácido oleico foi consumido rapidamente na batelada DCX-7, em comparação com a batelada DCX-6, resultando em um aumento na formação do hidrocarboneto C₁₄. Esse comportamento justifica a maior liberação de CO₂ observada, refletida, tanto no aumento da pressão, quanto na titulação da solução alcalina no kitassato posicionado na linha de drenagem dos gases da reação.

Conclusões

Os experimentos realizados com as bateladas DCX-6 e DCX-7 permitiram avaliar a influência do suporte catalítico no processo de descarboxilação do ácido oleico. A batelada DCX-7 é a que possui nossa maior atenção.

Referências Bibliográficas

- [1] LUCANTONIO, Stefania; DI GIULIANO, Andrea; ROSSI, Leucio; GALLUCCI, Katia. Green Diesel Production via Deoxygenation Process: A Review. *Energies*, v. 16, n. 2, p. 844, 2023.
- [2] DU, Xiangze; ZHANG, Rui; LI, Dan; HU, Changwei; GARCIA, Hermenegildo. Molybdenum carbide as catalyst in biomass derivatives conversion. *Journal of Energy Chemistry*, v. 73, p. 68-86, 2022.
- [3] MAHDI, Hilman Ibnu; BAZARGAN, Alireza; McKAY, Gordon; WAN AZELEE, Nur Izyan; MEILI, Lucas. Catalytic deoxygenation of palm oil and its residue in green diesel production: A current technological review. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 173, p. 68-86, 2021.
- [4] HONGLOI, Nitchakul; PRAPAINAINAR, Paweena; PRAPAINAINAR, Chaiwat. Review of green diesel production from fatty acid deoxygenation over Ni-based catalysts. *Molecular Catalysis*, v. 111, p. 696-712, 2021.

Síntese de Lignina Aminada para Absorção De CO₂

Filipe M. Solon; Carlos E. A. Padilha; Domingos F. S. Souza;*

*Laboratório de Energias Alternativas e Fenômenos de Transporte (LEAFT)/NUPEG - Departamento de Engenharia Química
filipemsolon@gmail.com

Introdução

O aumento da temperatura, que já cresceu em média 1 °C, tem potencializado fenômenos destrutivos ao redor do globo terrestre, o qual se dá pela emissão excessiva dos gases de efeito estufa (GHGs). Esse movimento data do começo do século XX, onde foram desenvolvidas indústrias e meios de transporte que utilizam, como principal fonte de energia, os combustíveis fósseis [1]. O principal agente causador do aquecimento global é o dióxido de carbono (CO₂) que tem sido produzido em escala crescente, até chegar aos atuais 37,4 bilhões de toneladas [2]. As grandes nações têm buscado meios para diminuir essa emissão, dando origem a pautas como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, que visam diminuir esse aumento para 1,5 °C, com limite de 2 °C. Para cumprir esse objetivo, foram desenvolvidos os métodos de CCUS (Carbon Capture Usage and Storage), que se baseiam em diminuir a liberação de CO₂ a partir da captura e uso ou armazenamento do gás.

Novas pesquisas são desenvolvidas anualmente para desenvolver melhores técnicas de captura, chegando a materiais que vão desde absorventes químicos, adsorventes e membranas, até alguns mais recentes como estruturas metalorgânicas e líquidos iônicos. As substâncias mais utilizadas são as aminas, pela sua boa reatividade com o CO₂ e, conseqüentemente, alto rendimento, além do baixo custo de produção. Elas, porém, contam com outros desgastes, como o alto teor de corrosividade e alto custo de regeneração do solvente [3].

Na procura de novas substâncias capazes de obter elevado rendimento, com menos problemas de processamento, surge a lignina. A lignina é uma macromolécula orgânica abundantemente encontrada na natureza, sendo a segunda maior biomassa existente, a qual também é produzida como subproduto numeroso em processos industriais como, por exemplo, na indústria de papel, o qual produz 50 - 70 milhões de toneladas de lignina por ano. Suas características industriais são interessantes, como a rica diversidade de grupos funcionais em sua estrutura, elevada estabilidade térmica, copiosa disponibilidade e baixo custo [4]. O uso de lignina é de bom proveito pois reduz a quantidade de ligninas técnicas, conseqüentemente, gerando renda para a cadeia de processamento de biomassas, além da obtenção de um absorvente de CO₂ mais “verde”, alinhando com os objetivos da ODS 9 e 13.

Considerando as muitas qualidades, bons aspectos de uso e possibilidades positivas de bons resultados utilizando a lignina, o presente estudo tem em vista a modificação da mesma, a partir da introdução de grupos nitrogenados na sua estrutura, sintetizando de maneira simples e eficaz, preparando-a adequadamente para a captura de CO₂ em escala miniaturizada (microsistemas).

Metodologia

Três substratos diferentes serão utilizados para modificação: lignina kraft, lignossulfonatos e lignina alcalina, oriunda da extração do sabugo de milho, que serão caracterizadas utilizando métodos espectroscópicos. O derivado sintetizado é produzido através da reação de Mannich (Figura 1), que consiste numa condensação envolvendo um composto nitrogenado, um aldeído não enolizável e o substrato [5]. A reação entre o primeiro e o segundo produz a chamada Base de Mannich, que é posteriormente adicionada ao substrato, provocando a aminação do mesmo.

Neste estudo, a síntese se dará utilizando uma solução de formaldeído em meio ácido, utilizando H₂SO₄, e a acrilamida para formação da base. Depois, a mesma será adicionada lentamente na solução do substrato escolhido para aminação, a qual é aquecida a uma temperatura de 60 °C por algumas horas. Posteriormente, o produto gerado será lavado e

centrifugado. A partir do produto obtido, será feita a caracterização.

A lignina modificada, depois de feita a solução, será testada para capturar o dióxido de carbono. O local de captura será num microssistema, na configuração em Y, que conta com duas entradas (líquida e gasosa) e duas saídas (Figura 2). A mistura é feita na junção do Y e percorre todo o caminho até as saídas.

Figura 1. Mecanismo simplificado da reação de Mannich.

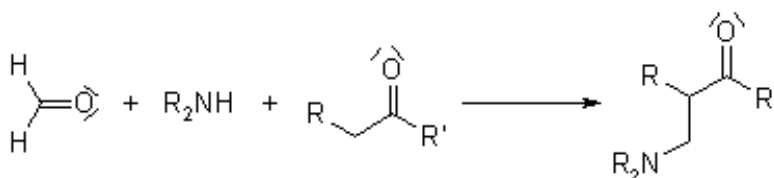
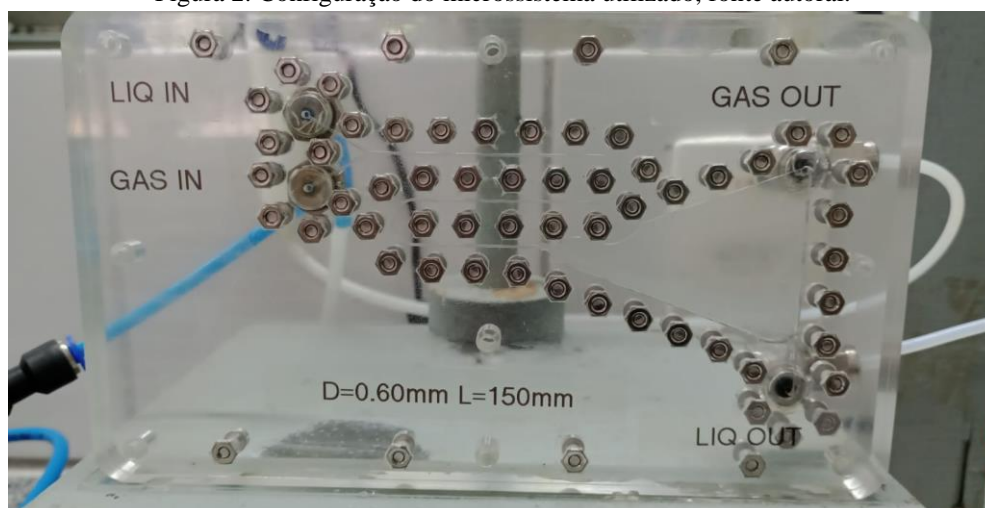


Figura 2. Configuração do microssistema utilizado, fonte autoral.



Resultados e Discussão

Já existem estudos utilizando ligninas modificadas para a captura de CO₂, que apresentam diversas vantagens como: a grande reutilização, fácil regeneração do solvente, alternativa “verde” para o processo de captura, além da geração de renda para o mercado de biorrefinarias [6]. Este trabalho visa levar a pesquisa mais adiante, intensificando o processo de captura utilizando os microssistemas, o qual vem ganhando destaque nas pesquisas mais recentes.

Referências Bibliográficas

- [1] Arnell, N. W., Lowe, J. A., Challinor, A. J., & Osborn, T. J. (2019). Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, 155(3), 377–391.
- [2] Greenhouse gas concentrations surge again to new record in 2023. (2024b, October 25). World Meteorological Organization. <https://wmo.int/news/media-centre/greenhouse-gas-concentrations-surge-again-new-record-2023>.
- [3] Liang, Z., Fu, K., Idem, R., & Tontiwachwuthikul, P. (2015). Review on current advances, future challenges and consideration issues for post-combustion CO₂ capture using amine-based absorbents. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(2), 278–288.
- [4] Stewart, D. (2007c). Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. *Industrial Crops and Products*, 27(2), 202–207.
- [5] <https://www.organic-chemistry.org/namedreactions/mannich-reaction.shtm>.
- [6] Cui, Y., He, B., Lei, Y., Liang, Y., Zhao, W., Sun, J., & Liu, X. (2022b). Lignin derived absorbent for efficient and sustainable CO₂ capture. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 54, 89–97.

Estudo de Degradação Térmica de Microalga In-Natura e Pós-Extração de Óleo

Maria A. C. de Oliveira; Maria B. A. Cunha; Joemil O. D. Junior; Karine F. S. Oliveira; Renata M. Braga*

Laboratório de Tecnologia Ambiental (LabTam), Departamento de engenharia química

**mariaantoniao@gmail.com*

Introdução

Com o propósito de atingir as metas globais de redução na emissão de Gases do Efeito Estufa, processos são desenvolvidos para transformar materiais renováveis em hidrocarbonetos. Uma alternativa é a produção de biocombustíveis, estando em destaque os de terceira geração pois não necessita de grandes espaços para sua produção e não compete com o mercado alimentício [1].

Dessa forma, uma das matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis de terceira geração são as microalgas. Estes seres unicelulares possuem elevada taxa de crescimento devido a sua capacidade de adaptabilidade, alto teor de lipídeos, capacidade de biorremediação além de serem fotossintetizantes, ou seja, realizam a captura de CO₂ para conversão em seu sistema [2].

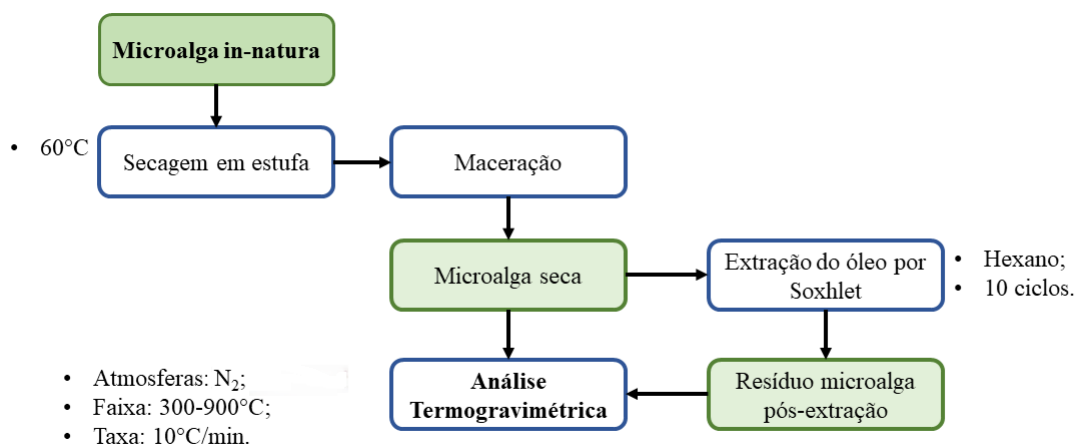
Um processo de destaque utilizado para conversão de microalga em hidrocarboneto é a pirólise, uma sequência de reações de conversão termoquímica na ausência de oxigênio. Para otimização desta técnica é interessante realizar a análise termogravimétrica do material para estudar a degradação térmica e simular uma pirólise, assim sabendo qual a melhor faixa de temperatura para aplicação [3].

Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar uma comparação da análise térmica (TGA/DTG) da microalga antes e após a extração de óleo, em atmosferas de ar sintético, para posterior aplicação no processo de pirólise.

Metodologia

O presente estudo seguiu o fluxograma detalhado na Figura 1. A biomassa utilizada foi um consórcio de microalgas fornecido pelo projeto "Captura Intensiva e Conversão de CO₂ Utilizando Produção de Microalgas para Geração de Valor, financiado pela Petrobras.

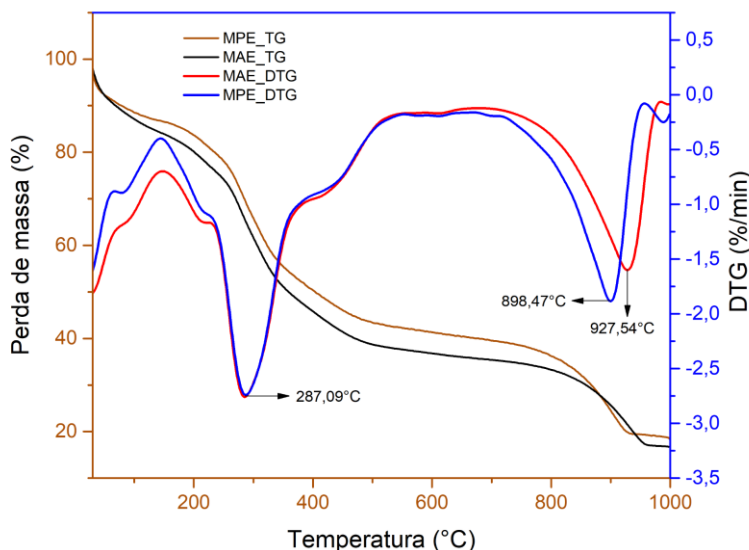
Figura 1. Fluxograma experimental.



Resultados e Discussão

Na figura 2 está representada as curvas de Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG) em atmosfera de nitrogênio para entender o comportamento de perda de massa das microalgas.

Figura 2. Análise Termogravimétrica em nitrogênio das amostras de microalga antes da extração de óleo (MAE) e pós-extração de óleo (MPE).



Pela figura é possível perceber que a perda de massa ocorre em três etapas nas duas microalgas, característica representativa da degradação térmica de biomassa lignocelulósica [4]. A primeira etapa ocorreu no intervalo de 30°C a 212°C, corresponde a perda de umidade residual presente na amostra, a MPE apresentou uma perda de massa de 10,37% enquanto a MAE perdeu 11,57%. A segunda etapa ocorreu entre 212°C a 623°C, correspondente a decomposição de carboidratos (celulose e hemicelulose), proteínas e lipídeos, onde a MPE perdeu 20,55% e a MAE 23,29%. A terceira etapa ocorre entre 623°C e 962°C, correspondente a degradação da clorofila e de pigmentos mais pesados, onde a MPE sofreu perda de 49,16% e a MAE 43,56%.

Quanto maior for a degradação de biomassa até 600°C maior será o rendimento da pirólise [3], sendo a microalga antes da extração de óleo que apresentou maior percentual de perda de massa ela se torna mais viável para a aplicação em pirólise. Vale ressaltar que o cultivo da microalga foi realizado em tanque aberto, sendo comum a aparição de impurezas (como areia e insetos) na amostra, podendo interferir na análise realizada.

Conclusões

De acordo com os resultados apresentados nas curvas de TG e DTG, a microalga antes da extração de óleo apresenta maior degradação da biomassa, indicando que em um processo de pirólise seu rendimento seria maior que o apresentado na microalga após a extração, sendo assim mais viável sua aplicação na produção de biocombustíveis de terceira geração por meio da pirólise.

Referências Bibliográficas

- [1] BRASIL, B. Microalgas: a 3ª geração de biocombustíveis no Brasil. Embrapa Agroenergia-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E), 2014.
- [2] BRASIL, B. Microalgas: a 3ª geração de biocombustíveis no Brasil. Embrapa Agroenergia-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E), 2014.
- [3] HUANG, Z.; ZHANG, J.; PAN, M.; HAO, Y.; HU, R.; XIAO, W.; LI, G.; LYU, T. Valorisation of microalgae residues after lipid extraction: pyrolysis characteristics for biofuel production. *Biochemical Engineering Journal*, v. 179, 1 fev. 2022.
- [4] KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 1126–1140, maio 2016.

Avaliação do Uso Óleo da Microalga para Produção de SAF
Maria B. A. Cunha; Joemil O. Deus Junior; Karine F. S. Oliveira; Renata M. Braga.*
Laboratório de Tecnologia Ambiental (LabTam) e Departamento de Engenharia Química
**beatrizanjosc@gmail.com*

Introdução

Apesar do crescente avanço de pesquisas em torno do desenvolvimento das fontes de energia limpa, os combustíveis fósseis ainda predominam como principal meio de geração de energia no mundo. Essa dependência é alarmante, pois a exploração, o processamento e a queima desses combustíveis geram graves impactos ambientais. Muitos desses danos são irreversíveis, reforçando a urgência de reduzir o uso de combustíveis fósseis e adotar alternativas mais sustentáveis [1, 2].

Segundo o relatório da RSB (*Roundtable on Sustainable Biomaterials*) de 2021 [3], 390 bilhões de litros de querosene de aviação são consumidos no mundo no tráfego aéreo mundial, enquanto apenas 14 milhões de litros de SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) são utilizados. Enquanto os combustíveis fósseis estão associados a altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à extração de recursos não renováveis, o SAF apresenta emissões significativamente menores e impactos ambientais reduzidos [4].

Uma das rotas mais vantajosas para a produção de combustível sustentável de aviação é a do drop-in, que consiste em gerar produtos que têm a estrutura molecular idêntica ao combustível fóssil, evitando a alterar a infraestrutura de refino, consumo, armazenamento e transporte [5]. A Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) reconhece sete patentes para a produção de SAF, permitindo a adição de um único combustível alternativo na composição do QAV. Os ésteres e ácidos graxos hidroprocessados sintetizados por algas, o óleo de microalga é usado como matéria-prima, está entre as patentes permitidas e atualmente pode ser misturado em até 10% com o combustível tradicional [6].

Algumas espécies de microalgas têm alto potencial para a produção de biocombustíveis pela sua grande capacidade de acúmulo de lipídeos, estima-se que seja possível produzir 50 mil litros de óleo por ano por hectare, mais que a maior parte das fontes de biocombustível de primeira e segunda geração [7, 8].

O craqueamento catalítico é um processo que submete o produto a condições extremas de temperatura e pressão, combinadas com o uso de catalisadores. Esse processo favorece a quebra dos hidrocarbonetos presentes no óleo, transformando-os em frações desejadas, como querosene de aviação. A alta produtividade das microalgas e sua capacidade de capturar CO₂ tornam essa abordagem uma alternativa sustentável, atendendo às demandas por combustíveis mais limpos no setor aéreo.

Por isso, o desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de produção de SAF a partir do craqueamento catalítico do óleo da microalga.

Metodologia

A primeira etapa terá início com a revisão bibliométrica a fim de um aprofundamento teórico no tema. Na sequência, começa a etapa de extração do óleo das microalgas, em que parte do óleo será designado para a caracterização e outra para os experimentos. A caracterização do óleo será realizada pelas seguintes análises: determinação de acidez, índice de refração, determinação do índice de saponificação, determinação do ponto de fusão, determinação de resíduo por incineração e cromatografia. O óleo será submetido ao craqueamento catalítico variando as condições operacionais e catalisadores objetivando identificar as condições ideais para maximizar a produção de SAF do processo.

Conclusões

Este estudo destaca o potencial do combustível sustentável de aviação como uma solução mais sustentável para a indústria aeronáutica, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis. A produção de SAF a partir de microalgas representa uma alternativa promissora ao querosene de aviação tradicional, com benefícios ambientais significativos baixa emissão de GEE além da captura de CO₂ durante o processo de cultivo.

Referências Bibliográficas

- [1] SINGH, Digambar et al. Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review. *Fuel*, [s. l.], v. 253, p. 60–71, 2019.
- [2] MOHIDDIN, MohdNurfirdaus Bin et al. Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, [s. l.], v. 98, p. 60–81, 2021.
- [3] RSB & Agroicone (2021). Disponibilidade de matéria-prima para combustível sustentável de aviação no Brasil: desafios e oportunidades. Roundtable on Sustainable Biomaterials, Suíça.
- [4] MACEDO, Pedro Aloy. O uso de combustíveis sustentáveis na aviação comercial brasileira: factibilidade, desafios e principais implicações. 2022. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) - Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.
- [5] GIARRANTE, G. G. Viabilidade econômica e ambiental do processo de Fischer-Tropsch para produção de combustível de aviação. Repositório Institucional da UFSCar: UFSCar, 2024.
- [6] ATAG - AIR TRANSPORT ACTION GROUP. Beginner's guide to sustainable aviation fuel. Ed. 4, Geneva, Suíça, 2023. Disponível em: <https://aviationbenefits.org/media/168027/atag-beginners-guide-to-saf-edition-2023.pdf>. Acesso em: 29 de dezembro de 2024.
- [7] DUARTE, K. R. Mapeamento tecnológico da utilização de microalgas para produção de biocombustíveis. Repositório Panthenon: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023.
- [8] FORNAZARI, M.; STRASSBURG, S. A.; BARICCATTI, R. A. Microalgas na produção de biodiesel: uma revisão ao longo dos anos. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, [S. l.], v. 22, n. 11, p. e7937, 2024. DOI: 10.55905/olelv22n11-208. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/7937>. Acesso em: 06 jan. 2025.

Integração de MEA na Captura de CO₂ para Mineralização de Carbono

Gabriel de Oliveira L. Almeida; Fedra A. V. Ferreira; Domingos F.S. Souza; Osvaldo Chivovone-Filho

Laboratório de fotoquímica e equilíbrio de fases – Departamento de engenharia química

**gabriel.almeida.700@ufrn.br*

Introdução

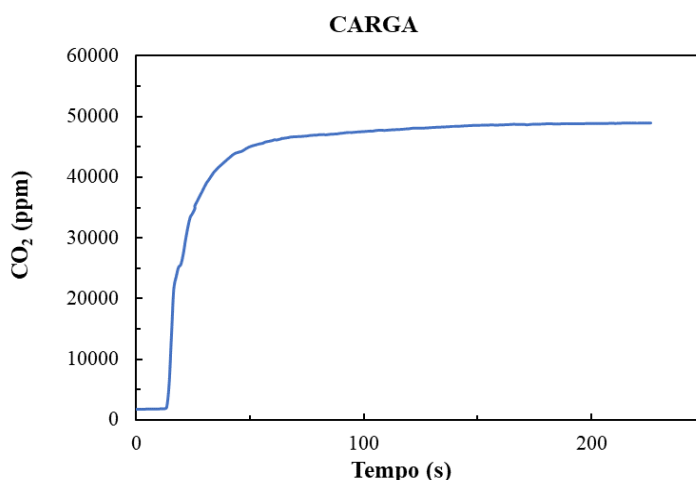
A emissão de dióxido de carbono (CO₂) é uma questão crítica no cenário global, devido ao seu papel central nas mudanças climáticas e no aquecimento global. Portanto, o estudo da captura e utilização do CO₂ (CCUS) é de extrema importância, para mitigar suas emissões na atmosfera. Entre as abordagens mais estudadas, o uso de aminas se destaca, embora enfrente desafios significativos, particularmente no que diz respeito aos elevados custos energéticos envolvidos na regeneração da MEA [1]. Uma abordagem alternativa em desenvolvimento é a combinação da mineralização do CO₂ com Ca(OH)₂, integrada à rápida absorção proporcionada pela MEA [2]. A integração dessa técnica com a absorção de CO₂ pela MEA oferece uma sinergia importante: enquanto a MEA é altamente eficaz na captura inicial de CO₂ devido à sua rápida taxa de reação, o uso de Ca(OH)₂ permite uma subsequente mineralização do gás, o que pode reduzir a energia necessária para a regeneração da amina e aumentar a capacidade total de captura do sistema. Isso ocorre porque parte do CO₂ absorvido pela MEA pode ser transferido para o Ca(OH)₂, liberando a MEA para capturar mais CO₂, com menos necessidade de regeneração térmica [3].

Metodologia

A metodologia seguida para avaliar a captura de CO₂ foi dividida em três experimentos distintos. Primeiramente, foi realizada a leitura do perfil de concentração de CO₂ em uma mistura gasosa com uma vazão de CO₂ de 40 mL/min e 100 mL/min de N₂, com o objetivo de estabelecer uma concentração base de CO₂ para todos os ensaios experimentais. A figura 1 representa a leitura do perfil de concentração de CO₂ da carga para o sistema (MEA + Ca(OH)₂ + H₂O). Os outros sistemas tiveram um comportamento semelhante.

Figura 1- Perfil de concentração de CO₂ da carga.

Fonte: Autoria própria (2025)



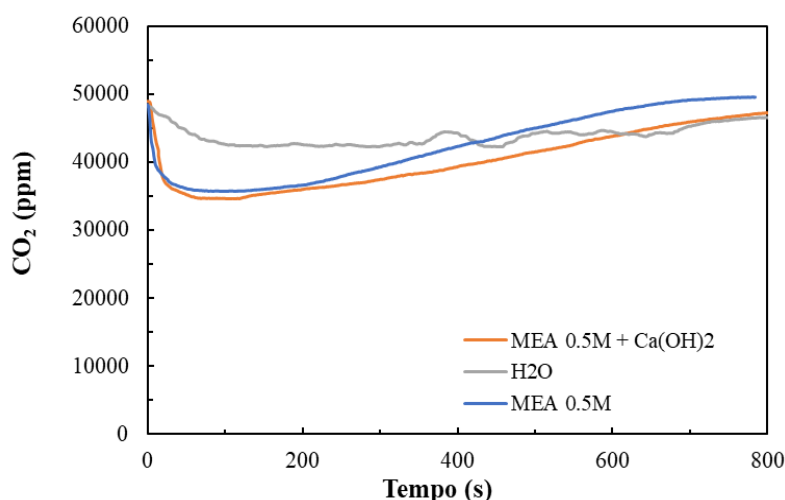
A mistura gasosa foi borbulhada na célula de vidro contendo as soluções de captura e o perfil de concentração para cada experimento foi coletado com o auxílio de um sensor de CO₂.

Resultados e Discussão

Os experimentos demonstraram que o sistema $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MEA}$ possui uma capacidade superior de captura de CO_2 em comparação com os outros sistemas avaliados (Gráfico 2). Além disso, observou-se a formação de CaCO_3 , um sal insolúvel e termodinamicamente estável, resultante da reação entre os íons carbonato e o Ca^{2+} [4].

Figura 2- Perfil de concentração de CO_2

Fonte: Autoria própria (2025)



O sistema contendo apenas água apresentou um tempo de estabilização muito maior e uma eficiência de captura de CO_2 significativamente menor, em comparação com os outros sistemas. Isso ocorre porque a capacidade de captura de CO_2 da água pura é muito inferior à das soluções contendo MEA e $\text{MEA} + \text{Ca}(\text{OH})_2$. A água, por si só, possui uma baixa solubilidade para o CO_2 , o que limita sua eficiência no processo de captura. O CO_2 dissolve-se na água formando ácido carbônico (H_2CO_3), mas este processo é lento e a quantidade de CO_2 que pode ser absorvida é relativamente pequena.

Conclusões

A combinação de MEA com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mostrou-se mais eficiente para a captura de CO_2 em comparação com sistemas individuais de MEA ou água. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ facilita a mineralização do CO_2 , reduzindo a necessidade de regeneração térmica da MEA e aumentando a eficiência energética do processo. Essa abordagem integrada representa um avanço promissor para a mitigação de emissões de CO_2 em escala industrial.

Referências Bibliográficas

- [1] Bhatti, U., Sivanesan, D., Lim, D., Nam, S., Park, S., & Baek, I. (2018). Metal oxide catalyst-aided solvent regeneration: A promising method to economize post-combustion CO_2 capture process. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*.
- [2] LIU, M.; GADIKOTA, G. Integrated CO_2 Capture, Conversion, and Storage To Produce Calcium Carbonate Using an Amine Looping Strategy. *Energy & Fuels*, v. 33, n. 3, p. 1722–1733, 24 set. 2018.
- [3] L. Kainiemi, S. Eloneva, A. Toikka, J. Levänen, M. Järvinen, Opportunities and obstacles for CO_2 mineralization: CO_2 mineralization specific frames in the interviews of Finnish carbon capture and storage (CCS) experts, *J. Clean. Prod.* 94 (2015) 352–358,
- [4] L. Kainiemi, S. Eloneva, A. Toikka, J. Levänen, M. Järvinen, Opportunities and obstacles for CO_2 mineralization: CO_2 mineralization specific frames in the interviews of Finnish carbon capture and storage (CCS) experts, *J. Clean. Prod.* 94 (2015) 352–358,

Adsorção de Cromo em Água Produzida Utilizando Biocarvão Dopado com Ferro
Letícia P. Araújo; Joyce A.B. Souza; Osvaldo Chiavone-Filho

Laboratório de Fotoquímica e Equilíbrio de Fases – Departamento de Engenharia Química
**leticia.pontes.018@ufrn.edu.br*

Introdução

No contexto da indústria de óleo e gás, a água produzida (AP) é um efluente de composição diversificada que varia de acordo com as características do reservatório e do tipo de processamento utilizado. Das substâncias presentes na AP, os metais se destacam negativamente, devido à sua toxicidade à saúde humana, sendo o cromo um representante desta classe, apresentando-se na AP com concentrações que variam de 0,1963 a 97,2 mg/L [1]. O processo de adsorção vem sendo bastante estudado para remoção de metais em água, principalmente, pelo seu baixo custo e seu alto desempenho em adsorver tais contaminantes. No entanto, adsorventes obtidos por rotas convencionais, nem sempre garantem a remoção de metais, sendo necessárias modificações na superfície desses materiais. Na literatura, é crescente o número de estudos que adicionam ferro na superfície de biocarvões visando melhorar o processo de adsorção dos metais [2]. O objetivo deste trabalho é estudar a adsorção de cromo em água, utilizando o biocarvão produzido da coroa do abacaxi, com ferro adicionado em sua superfície.

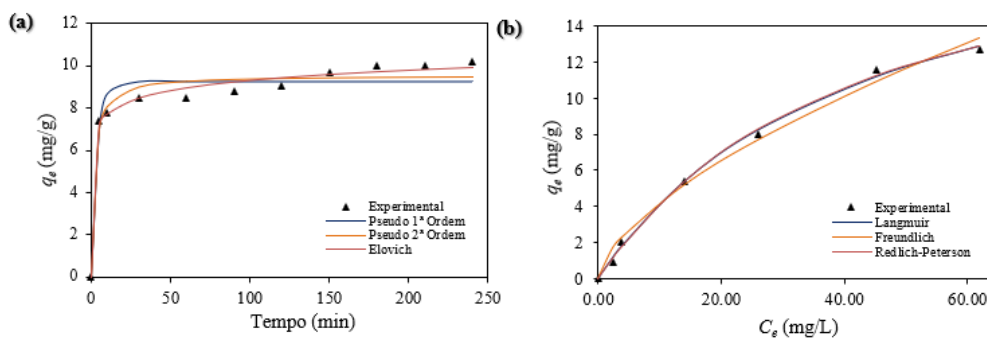
Metodologia

As coroas de abacaxi utilizadas como biomassa foram obtidas na feira livre do município de Santa Cruz/RN. Elas foram secas em estufa (2 h, a 100 °C), moídas por um moinho de bolas (1 h, 150 rpm) e peneiradas em peneira com malha de 30 mesh (425 µm), sendo o material passante utilizado para síntese do biocarvão. O material foi posto em um reator cilíndrico metálico e a pirólise ocorreu em forno mufla (300 °C por 90 min). O biocarvão (BC) obtido foi dopado com ferro (BC-Fe). Para isto, utilizou-se uma metodologia adaptada [3], onde 5 g de BC foram misturados a uma solução com 5 g de cloreto de ferro III hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Dinâmica) e 2,78 g de sulfato de ferro II heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Dinâmica) em 150 mL de água destilada. O pH da solução foi corrigido para cerca de 10, através de algumas gotas de uma solução 10 M de NaOH. Por fim, essa suspensão permaneceu em agitação por 1 hora a 80°C, sendo, posteriormente, separado por filtração simples e levado para secar por 24 horas a 60°C, obtendo o BC-Fe. Para o estudo cinético, foram adicionados a erlenmeyers 0,15 g do BC-Fe (massa estabelecida mediante testes preliminares) em 50 mL de uma solução 50 mg/L de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Os ensaios permaneceram sob agitação em incubadora *shaker* a 150 rpm, com intervalos de tempo variando de 5 a 240 min. Os ensaios para equilíbrio de adsorção foram realizados através de isotermas de adsorção. Para tanto, 50 mL das soluções com diferentes concentrações iniciais (5 a 100 mg/L) foram adicionados a erlenmeyers, juntamente com 0,15 g do BC-Fe. O sistema foi mantido sob agitação durante 180 minutos em incubadora *shaker* a 150 rpm, em temperatura ambiente. A concentração final do cromo em solução nos ensaios realizados, foi medida através de espectrofotometria UV-Vis, no comprimento de onda igual 350 nm.

Resultados e Discussão

Na Figura 1.a, estão apresentados os resultados obtidos e os modelos matemáticos da literatura ajustados para o estudo cinético da adsorção de cromo com o BC-Fe. É possível observar que o tempo de equilíbrio foi atingido em cerca de 180 minutos, evidenciando o preenchimento dos sítios ativos do biocarvão no decorrer do tempo, conforme o que é relatado em estudos [4]. Na Figura 1.b encontram-se os dados experimentais da isoterma do processo de adsorção estudado, além dos modelos matemáticos aplicados aos dados experimentais. Os modelos estudados atingiram valores de R^2 superiores a 0,90, sendo o melhor ajuste o modelo de Langmuir ($R^2 = 0,9974$). Possivelmente, isto implica que o processo de adsorção ocorre em monocamada [5].

Figura 1. Dados experimentais e modelos cinéticos (a) e de isotermas de adsorção (b).



Na Tabela 1, é possível encontrar detalhadamente os parâmetros calculados para os modelos cinéticos e as isothermas de adsorção. No caso dos modelos cinéticos, observa-se que, para os modelos de Pseudo 2ª ordem e de Elovich o R^2 foi superior a 0,95. Para o modelo de Pseudo 2ª Ordem ($R^2 = 0,9667$), obteve-se a constante de taxa de adsorção (K_2) igual a 0,0572 g/mg.min e a quantidade adsorvida no equilíbrio (q_e) igual a 9,5409 mg/g. Já, para o modelo de Elovich ($R^2 = 0,9903$), os valores obtidos da taxa de adsorção inicial (α) e da constante de dessorção (β) foram iguais a 4712,62 mg/g.min e 1,4466 mg/g.

Tabela 1. Parâmetros obtidos através dos modelos cinéticos e isothermas de adsorção.

Modelos Cinéticos					
Pseudo 1ª ordem		Pseudo 2ª ordem		Elovich	
R^2	0,9438	R^2	0,9667	R^2	0,9903
K_1	0,2770	K_2	0,0572	α	4712,62
q_e	9,2708	q_e	9,5409	β	1,4466
Isothermas					
Langmuir		Freundlich		Redlich-Peterson	
R^2	0,9974	R^2	0,9903	R^2	0,9974
$q_{m\acute{a}x}$	21,8054	n	1,5758	a_{RP}	0,0168
K_L	0,0234	K_F	0,9734	β_{RP}	1,0646
				K_{RP}	0,4892

Ainda na Tabela 1, para os modelos de isothermas analisados, observou-se que o modelo de Langmuir obteve o melhor ajuste, sendo a quantidade adsorvida máxima ($q_{m\acute{a}x}$) igual a 21,8054 mg/g e a constante de interação adsorvato-adsorvente (K_L) equivalente a 0,0234 L/mg. Na literatura também são encontrados bons ajustes para o modelo de Langmuir na adsorção de cromo com biocarvões dopados com ferro [2, 5].

Conclusões

Com base nos resultados apresentados, o estudo cinético da adsorção de cromo utilizando BC-Fe demonstrou que o tempo de equilíbrio foi atingido em aproximadamente 180 minutos, confirmando o preenchimento gradual dos sítios ativos do biocarvão ao longo do processo, conforme observado na literatura. O modelo de Elovich destacou-se pelo maior ajuste ($R^2 = 0,9903$). No estudo das isothermas, o modelo de Langmuir apresentou o melhor desempenho, com $R^2 = 0,9974$, sugerindo que a adsorção ocorre predominantemente em monocamada. Esses resultados evidenciam a eficiência do biocarvão dopado com ferro (BC-Fe) como adsorvente, bem como a aplicabilidade de modelos matemáticos para determinação de parâmetros dos processos de adsorção.

Referências Bibliográficas

- [1] Alomar, T.S.; Hameed, B.H.; Usman, M.; *et al.* Recent advances on the treatment of oil fields produced water by adsorption and advanced oxidation processes. *J Water Process Eng*, 49, 2022.
- [2] Juturu, R.; Selvaraj, R.; Murty, V.R. Efficient removal of hexavalent chromium from wastewater using a novel magnetic biochar composite adsorbent. *J Water Process Eng*, 66, 2024.
- [3] Wan, X.; Li, C.; Parikh, S.J. Simultaneous removal of arsenic, cadmium, and lead from soil by iron-modified magnetic biochar. *Environmental Pollution*, 261, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114157>.
- [4] Masuku, M.; Nure, J.F.; Atagana, H.I.; *et al.* Pinecone biochar for the Adsorption of chromium (VI) from wastewater: Kinetics, thermodynamics, and adsorbent regeneration. *Environ Res*, 258, 2024.
- [5] Nyamato, G.S.; Kabogo, I.T.; Maqinana, S.; *et al.* Removal, mechanistic and kinetic studies of Cr(VI), Cd(II), and Pb(II) cations using Fe₃O₄ functionalized Schiff base chelating ligands. *Environ Sci Pollut Res*, 31, 2024.

Densidade de Soluções Aquosas Eletrolíticas em Altas Pressões Via Simulação Molecular
Monteiro, M. F.; Detogni, J. L. H.; Abreu-Silva, R.; Chiavone-Filho, O.*
Nupeg - Laboratório de Simulação; Departamento de Engenharia Química
**mateus@nupeg.ufrn.br*

Introdução

Misturas aquosas contendo Cloreto de Sódio (NaCl) estão presentes em diversos ramos industriais e bioquímicos. A densidade dessas misturas desempenha papel crucial na formulação de fluidos de completação para evitar a fratura da formação ou invasão de fluídos em poços de petróleo. Portanto, determinar essa propriedade em condições de reservatório (altas pressões, temperaturas e salinidade) é fundamental.

Dinâmica Molecular (MD) é um ramo da modelagem que permite estudar sistemas moleculares complexos. Essa técnica utiliza computadores para aplicar as leis de conservação de movimento em partículas confinadas em uma caixa de simulação, permitindo obter propriedades físico-químicas do sistema a partir de seu estado. As interações entre as partículas permitem calcular a força em cada uma pelo gradiente de energia potencial. Essa energia é proveniente de interações intramoleculares e aproximação de pares de átomos (*Force Fields*). Tradicionalmente, misturas aquosas com eletrólitos utilizam uma combinação de interações de Lennard-Jones para partículas dentro de um raio de corte, enquanto as demais sofrem interações de Coulomb.

Simulações aplicando o conjunto estatístico NpT (massa, temperatura e pressão constantes) são úteis pois utilizam informações geralmente conhecidas em um processo, além de permitir a troca de calor e trabalho com o ambiente, simulando condições reais de operação.

O objetivo deste trabalho foi utilizar a técnica de MD com simulações NpT para calcular a densidade de misturas aquosas binária contendo NaCl em condições de reservatório. Os resultados foram comparados com os dados disponíveis na literatura científica, para avaliar a qualidade dos dados produzidos.

Metodologia

Os sistemas moleculares foram construídos utilizando o software Playmol [1]. A molécula de água seguiu o modelo TIP4P/2005 [2], e os íons foram estruturados como esferas com carga e massa utilizando parâmetros de *Force Fields* propostos por Madrid-2019 [3]. A caixa de simulação continha dimensões 40 x 40 x 40 Å, e condições periódicas foram aplicadas nas fronteiras. Foram utilizadas 555 moléculas de água em todas as simulações, e a quantidade de NaCl foi calculada em função da concentração molal da mistura, *b*. O conjunto estatístico NpT foi empregado, com a temperatura, *T*, variando de 283.15 K até 363.15 K passo 10 K, pressões, *P*, de 5; 10; 50; 100; 250; 500 e 1000 bar, simulando as condições de reservatórios, e concentrações de 0.5; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0; 5.5 e 6.0 mol·kg⁻¹, contemplando misturas diluídas e concentradas.

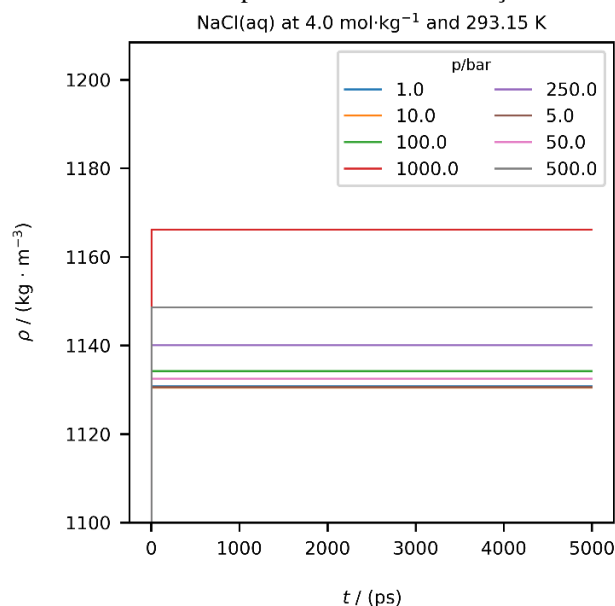
As dinâmicas foram realizadas aplicando o programa LAMMPS [4]. Cada simulação utilizou um passo de tempo igual a 1 fs e 5 milhões de passos, totalizando 5 ns que garantiu a estabilização do sistema. A densidade média foi extraída utilizando os valores do último 1 ns, e a incerteza foi calculada pelo desvio padrão.

Dados experimentais foram obtidos das ref. [5, 6]. Esses valores foram interpolados para estimar as densidades nas condições de mistura estudadas, e a comparação foi efetuada avaliando os desvios entre os conjuntos.

Resultados e Discussão

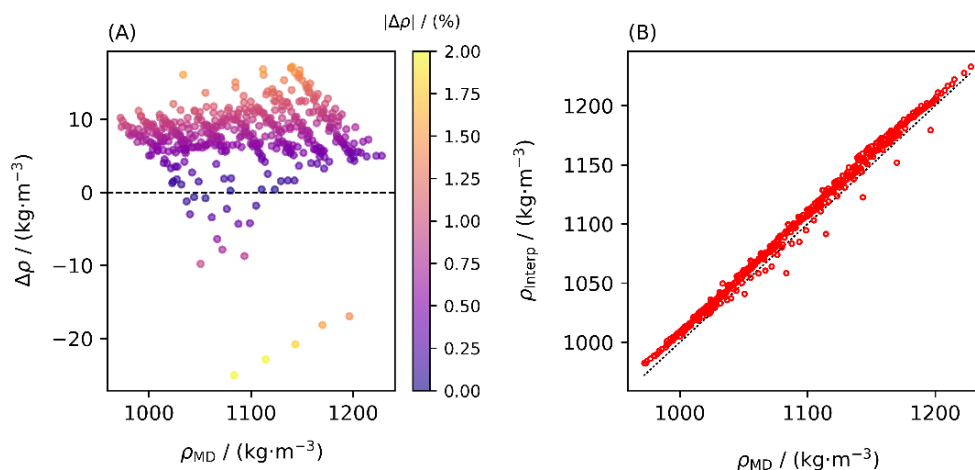
A Figura 1 apresenta a convergência de densidade para simulações em diferentes isobáricas. O efeito da pressão se torna expressivo para condições superiores a 100 bar. Esses resultados mostram que esse gradiente é significativo em condições de reservatório, e devem ser considerados principalmente para poços profundos.

Figura 1: Convergência da densidade calculada por MD em uma simulação de 5000 ps e diversas isobáricas.



A Figura 2A permite avaliar os desvios e desvios relativos absolutos entre as densidades de MD e experimentais interpolados. O desvio médio absoluto dos dados foi igual a $8.475 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (0.775 %). A correlação linear (Figura 2B) mostra um excelente ajuste, com coeficiente de determinação igual a 0.9971. Portanto, as estimativas feitas com modelagem MD obtiveram resultados satisfatórios em relação aos dados experimentais.

Figura 2: Desvios e desvios relativos absolutos (A) e correlação linear (B) entre as densidades de MD (ρ_{MD}) e experimentais interpoladas (ρ_{interp}).



Referências Bibliográficas

- [1] Charles RA; Abreu; Iuri; Segtovich; Gabriel-MS; ajsilveira. atoms-ufrrj/playmol v1.0. Zenodo; 2018.
- [2] Abascal JLF; Vega C. A general purpose model for the condensed phases of water: TIP4P/2005. *J Chem Phys.* 2005.
- [3] Blazquez S; Conde MM; Abascal JLF; Vega C. The Madrid-2019 force field for electrolytes in water using TIP4P/2005 and scaled charges: Extension to the ions F⁻, Br⁻, I⁻, Rb⁺, and Cs. *J Chem Phys.* 2022.
- [4] Thompson AP; Aktulga HM; Berger R; Bolintineanu DS; Brown WM; Crozier PS; in 't Veld PJ; Kohlmeyer A; Moore SG; Nguyen TD; Shan R; Stevens MJ; Tranchida J; Trott C; Plimpton SJ. LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales. *Comput Phys Commun.* 2022.
- [5] Pitzer KS; Peiper JC; Busey RH. Thermodynamic properties of aqueous sodium chloride solutions. *J Phys Chem Ref Data.* 1984.
- [6] Lvov SN; Wood RH. Equation of state of aqueous NaCl solutions over a wide range of temperatures, pressures and concentrations. *Fluid Phase Equilib.* 1990.