



ANAIS DO EVENTO

IV Workshop do PRH 54



Gerido por:



de 03/03/2026 até 04/03/2026

São Luís - MA

ÍNDICE

BIOCOMBUSTÍVEIS E OUTRAS FONTES DE ENERGIA

Análise Do Perfil Fitoquímico E Atividade Antioxidante De Extratos Vegetais Como Aditivos Para Biodiesel	1
Análise Técnico-econômica De Etanol De Milho No Maranhão	3
Caracterização Termofísica Dos Resíduos Do Algodão Para Fins Energéticos	5
Modelagem Termodinâmica Por Maximização De Entropia: Validação Do Algoritmo Maxs No Software Livre Tes Aplicado À Scwg Da Biomassa	7
Pirólise De Biomassas Da Amazônia Legal: Simulação E Testes Experimentais	9

QUÍMICA NAS INDÚSTRIAS DO PETRÓLEO, DE BIOCOMBUSTÍVEIS E DE

Desenvolvimento De Processo Fotocatalítico Para Obtenção De Diesel Verde Via Descarboxilação	11
--	----

SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO EM PETRÓLEO, GÁS NATURAL

Avaliação Do Impacto Do Preço Do Carbono No Mercado De Energia Elétrica	13
Controlador Ótimo Periódico De Atitude E Calado Para Plataforma Semissubmersível Via Programação Dinâmica Adaptativa	15
Despacho De Sistemas De Potência Híbridos Com Integração De Usinas Hidrelétricas Reversíveis Para Redução De Emissões De Carbono	17
Integração De Redes Neurais Profundas E Ica No Mapeamento De Sedimentos Da Margem Equatorial Brasileira	19
Modelagem Não-linear E Controle Ótimo Mimo De Plataformas Semissubmersíveis: Uma Abordagem Híbrida Via Hdp, Ad-hdp E Mpc	21
Redes Neurais Discretas Para Aprimorar A Análise Sedimentar Da Margem Equatorial Brasileira	23
Sistemas De Aquisição, Tratamento E Construção De Conjunto De Dados Para Detecção E Estimativa De Eventos Em Sistemas Complexos	25

TRANSPORTE, REFINO E PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

Caracterização Química De Extratos Vegetais Como Bioaditivos Para A Indústria De P&g	27
Esponjas Superhidrofóbicas Fabricadas A Partir De Sio ₂ /fibras De Pet Para Separação Óleo/água Em Efluentes Do Setor De Petróleo E Gás	29

Organização

Coordenador(es) do Comitê de Programa

DENNYS CORREIA DA SILVA

KATIA SIMONE TEIXEIRA DA SILVA DE LA SALLES

Coordenador(es) Adjunto(s) do Comitê de Programa

ANA CAROLINA LOBATO FEITOSA

BIANCA DE MELO MAIA DAS NEVES

BRENA LHAIS MENDES AROUCHE

EMILLY ROCHA CUNHA

HELLEN MARIA PINTO PINHEIRO

ISADORA EMANUELLE COSTA PINHEIRO

ISADORA MANUELA VIEIRA JUCA

JOSE HENRIQUE SOARES LIMA

LIVIA CORREIA MOUZINHO

LUANA FALCAO GONCALVES

NATALIA SIQUEIRA VIANA

PAULO SERGIO ARAUJO OLIVEIRA

WENDELL FERREIRA DE LA SALLES

Comitê de Programa

ANA CAROLINA LOBATO FEITOSA

BIANCA DE MELO MAIA DAS NEVES

BRENA LHAIS MENDES AROUCHE

EMILLY ROCHA CUNHA

HELLEN MARIA PINTO PINHEIRO

ISADORA EMANUELLE COSTA PINHEIRO

ISADORA MANUELA VIEIRA JUCA

JOSE HENRIQUE SOARES LIMA

LIVIA CORREIA MOUZINHO

LUANA FALCAO GONCALVES

NATALIA SIQUEIRA VIANA

PAULO SERGIO ARAUJO OLIVEIRA

**IV WORKSHOP DO PRH-54
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**

***ANÁLISE DO PERFIL FITOQUÍMICO E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DE EXTRATOS
VEGETAIS COMO ADITIVOS PARA BIODIESEL***

Caroline Barros Mesquita*; Beatriz Barros Mesquita; Jaciene Jesus Cardoso

****caroline.bm@discente.ufma.br***

Resumo executivo:

Usinas de biocombustíveis e distribuidoras enfrentam obstáculos operacionais devido à instabilidade oxidativa do biodiesel, que afeta o atendimento aos requisitos de qualidade (estabilidade oxidativa, índice de acidez, etc.) da Resolução da ANP nº 989/2025. O descumprimento dessas normas contribui para a elevação do OPEX da indústria, impactando na necessidade de reprocessamento do combustível e na formação de borras nos tanques de armazenamento. Este estudo investiga o potencial antioxidante de dois extratos vegetais maranhenses na estabilidade oxidativa do biodiesel metílico de soja. Caracterizações químicas e o teste fitoquímico foram realizados nos extratos. A eficácia foi comprovada quanto ao potencial antioxidante por meio do sequestro de radicais DPPH e ABTS. Os estudos apresentaram satisfatórios resultados de IC₅₀ de 2,18 mg/L e 37,05 mg/L para o Extrato 1 (ECC) e para o Extrato 2 (EVG) 114,86 mg/L e 24,50 mg/L. Tais resultados indicam o potencial da solução em otimizar o OPEX das usinas de biocombustíveis ao atuar como uma alternativa de baixo impacto ambiental aos aditivos sintéticos.

Palavras chaves: Bioaditivos; Estabilidade oxidativa; Biodiesel; Extratos vegetais; Antioxidantes.

Metodologia e normas:

Neste trabalho, avaliou-se o desempenho dos extratos de duas espécies botânicas maranhenses como bioaditivos antioxidantes para biocombustíveis. A extração empregou o álcool etílico P.A. como solvente extrator, em uma relação de 1:4 (m/v) para o EVG e 1:28 (m/v) para o ECC, na ausência de luz por 24 e 72 horas, respectivamente, utilizando a matéria-prima previamente moída. Para a triagem qualitativa dos constituintes químicos, realizou-se a análise fitoquímica, baseada nas condições propostas por Matos *et al.* (1997). Os grupos funcionais foram determinados através de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR (modelo Shimadzu: IR-Prestige-21) na região de varredura de 400—4000 cm⁻¹, em análises de transmitância com pastilhas de KBr. A capacidade antioxidante dos extratos vegetais foi mensurada pelas técnicas de sequestro dos radicais DPPH e ABTS, utilizando espectrofotômetro UV-Vis para determinação do IC₅₀ (concentração necessária para inibir 50% dos radicais) (Rufino, 2007).

Resultados & Discussão

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados das etapas de extração, caracterização fitoquímica e avaliação da capacidade antioxidante dos extratos ECC e EVG com foco na viabilidade técnica como bioaditivos para a implementação em biocombustíveis. O desempenho da extração foi avaliado por meio do rendimento percentual de cada metodologia. Do ponto de vista operacional, o extrato ECC, obtido por extração simples, apresentou 7,1% (V/V), enquanto o extrato EVG obteve resultados de 7,7% (V/V). É importante ressaltar que o rendimento não é o único fator de garantia da extração, visto que a concentração de princípios ativos funcionais (antioxidantes) determina a eficácia do bioaditivo. A análise fitoquímica detectou a presença de moléculas essenciais para a estabilização de radicais livres e a mitigação da oxidação. Os resultados indicam que fenóis, flavonóis e catequinas estão presentes nos extratos EVG e ECC, enquanto a flavanona foi determinada apenas na amostra do ECC. Do ponto de vista químico, a presença de anéis aromáticos conjugados e grupos hidroxilas (—OH) observada nestes compostos conferem aos extratos uma elevada densidade eletrônica. Isso permite a deslocalização de elétrons por ressonância, atuando potencialmente na estabilização radicais livres, e na interrupção da reação em cadeia da oxidação lipídica, prevenindo reações de oxidação que aceleram a degradação oxidativa do biocombustível. A espectroscopia no infravermelho ratificou a presença dos grupos funcionais antioxidantes, pois observou-se bandas largas em 3400—3300 cm⁻¹ relacionadas ao estiramento de hidroxilas (OH) de álcoois ou fenóis, presentes em ambos os extratos. Picos em 900—650 cm⁻¹ são predominantemente atribuídos aos

dobramentos de ligações =C-H aromáticas, característicos de catequinas e flavonoides. Os resultados obtidos indicam que os extratos podem atuar como sequestradores de radicais livres, oferecendo uma alternativa sustentável à aditivos químicos sintéticos.

Próximos Passos:

Para os próximos meses, o projeto avançará para a produção do biodiesel que foi preparado a partir da reação de transesterificação do óleo de soja com o álcool metílico PA, com razão molar 1:6, utilizando KOH 1% (m/m) como catalisador, em uma temperatura de 65 °C por 1 h, focando na validação da estabilidade oxidativa e na conformidade regulatória da Resolução ANP nº 989/2025. Inicialmente, será feita a caracterização do biodiesel em escala laboratorial com a realização de ensaios físico-químicos como índice de acidez (ASTM D664), índice de peróxido (ASTM D3703), teor de umidade (ASTM D6304), objetivando atingir o período mínimo de indução de 12 horas estabelecido pela ANP nº 989/2025 pelo método de Rancimat (EN 14112), antes e após a aditivação com bioaditivos. Será feita uma simulação de armazenamento industrial (temperatura, exposição ao ar) por 90 dias, sob condições de estresse acelerado, visando avaliar o desempenho oxidativo do combustível após a aditivação. Planeja-se, ainda, realizar ajustes metodológicos nos testes de envelhecimento com oxidação acelerada e fluxo de ar, para simular condições críticas de armazenamento enfrentadas por usinas. Objetivando a comprovação da efetividade dos antioxidantes de origem vegetal, pretende-se demonstrar desempenho em parâmetros de estabilidade igual ou superior a 90% da eficácia dos antioxidantes sintéticos como indicado na literatura (Freitas, 2018). Ao final, será entregue um relatório técnico incluindo indicadores de estabilidade oxidativa e taxas de consumo do aditivo e a escrita de um artigo científico para publicação, demonstrando a confiabilidade operacional do produto final.

Conclusões, TRL & Escalabilidade:

Os resultados obtidos comprovam que o uso dos extratos vegetais avaliados é viável para a estabilização oxidativa do biodiesel, apresentando rendimentos na extração de 7,1% e 7,7% (V/V), respectivamente. A eficácia antioxidante foi evidenciada pelos valores de IC₅₀, sugerindo o potencial da solução em mitigar a formação de produtos da oxidação do biodiesel nos tanques de armazenamento e a minimização de problemas operacionais, como entupimentos, e consequente redução do OPEX, a serem confirmados por testes de estabilidade oxidativa. A confirmação da presença de fenóis, flavonoides e catequinas indica o potencial de estabilização de radicais livres por ressonância, o que confere ao biocombustível uma perspectiva de proteção contra a degradação precoce, a depender da concentração e das condições do meio reacional. A pesquisa encontra-se em TRL 3, com a eficácia dos bioaditivos validada em ambiente laboratorial. Para atingir uma TRL 4, serão realizados testes de estabilidade oxidativa pelo método Rancimat e o monitoramento do comportamento do combustível em condições de armazenamento real. Levando em consideração a EHS (Environment, Health and Safety), o projeto destaca-se por ser uma alternativa de baixo impacto ambiental, pois utiliza espécies vegetais e o etanol como solvente na extração, que é recuperado por evaporação rotativa, minimizando riscos de descarte inadequado de reagentes. Apesar do impacto ambiental e à saúde humana associado ao metanol, sua aplicação industrial ocorre sob rigorosos protocolos de segurança. Além disso, a recuperabilidade do solvente permite o gerenciamento eficiente dos resíduos, mitigando os riscos de contaminação e otimizando o processo produtivo. Por isso, é importante implementar um sistema de destilação em circuito fechado, para recuperação e o reuso do metanol residual. O potencial de escalonamento industrial é elevado, levando em conta que a metodologia proposta como lavagem, secagem, trituração e extração utiliza operações unitárias convencionais da indústria de processamento vegetal. Demanda-se a integração de sistemas de extração contínua em contracorrente e unidades de recuperação de solvente, permitindo o tratamento de grandes volumes de matéria-prima. O diferencial competitivo reside na abundância das espécies selecionadas, cuja ampla disponibilidade sazonal e estruturação da logística regional favorecem a segurança da cadeia de suprimentos e a otimização em unidades industriais.

Referências Essenciais

- FREITAS, J. Evaluation of antioxidant activity of extracts of the oxidative stability of cottonseed biodiesel. 2019.
- MATOS, F. J. A. Introdução à fitoquímica experimental. Fortaleza: Ed. 141 p. 1997.
- RUFINO, M. Determinação da atividade antioxidante em frutas pela captura do DPPH. Embrapa, Fortaleza. 2007.

IV WORKSHOP DO PRH-54 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE ETANOL DE MILHO NO MARANHÃO

Josias S. Pereira#1*; Nahieh T. Miranda#2

PRH-ANP 54/UFMA – Coordenação do Curso de Química Industrial

***josias.sp@discente.ufma.br**

Resumo Executivo

A indústria de etanol de milho vem crescendo no Brasil pela ampla oferta de milho, geração de coprodutos valiosos e diversificação energética, reduzindo parcialmente a dependência da cana-de-açúcar. No Maranhão, ainda há poucos estudos, mas a instalação de uma planta em 2025 marca um avanço na diversificação energética, com inovação, empregos e integração agropecuária. Este trabalho propõe uma avaliação técnico-econômica da produção de etanol de milho no Maranhão, com balanços de massa e energia e parâmetros econômicos, visando identificar oportunidades de redução de custos industriais por meio da coleta de dados reais de indústria e da caracterização do milho local, contribuindo para o fortalecimento dessa tecnologia.

Palavras-chave: etanol de milho; análise técnico-econômica; balanços de massa e energia; CAPEX; OPEX.

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

O estudo avalia técnico-economicamente a produção de etanol de milho no Maranhão. Na primeira etapa, mapeou-se o processo e seus desafios, incluindo preparo, moagem, cozimento, fermentação, destilação, desidratação e tratamento de coprodutos. Em seguida, serão reunidos dados industriais e bibliográficos sobre vazão de alimentação, consumo energético, volumes produzidos, resíduos e coprodutos. Esses dados embasam os balanços de massa e energia e a análise técnica do processo, bem como o preparo e a caracterização da matéria-prima, milho *in natura* da região sul do Maranhão. A análise econômica baseada em Turton *et al.* (2018) e Humbird *et al.* (2011) inclui fluxo de caixa e indicadores como despesas de capital (CAPEX – *Capital Expenditure*), despesas operacionais (OPEX – *Operational Expenditure*), valor presente líquido (VPL), preço mínimo de venda (PMV), taxa interna de retorno (TIR) e tempo de retorno do investimento (*payback period* – PBP). A análise de sensibilidade aprofundará a compreensão dessa cadeia no Maranhão, identificando desafios de custo e oportunidades de otimização.

Resultados & Discussão

Com 1 tonelada de milho seco (umidade $\approx 15\%$) obtêm-se aproximadamente mais de 400 litros de etanol hidratado, 212 kg de DDGS (*Dried Distillers Grains with Solubles* – Grãos Secos de Destilaria com Solúveis) e 19 kg de óleo (UNEM, 2026), gerando diferentes receitas. Os consumos energéticos industrial e agrícola no processamento do milho foram estimados, respectivamente, em $3.882,2 \text{ MJ.t}^{-1}$ e $23.294,3 \text{ MJ.ha}^{-1}$, sendo 50 % referente às etapas de hidrólise, sacarificação e tratamento do caldo, enquanto a destilação representou 43 % (Salla; Furlaneto, 2010; Zhou; Yan, 2024), elevando o consumo específico de energia (Oliveira; Cruz, 2023). A composição do milho (71 % de amido, 9,5 % de proteínas, 9 % de fibras e 4 % de lipídeos) (Kwiatkowski *et al.*, 2006), aliada às características físico-químicas, tamanho de partículas e propriedades funcionais, influencia o pré-tratamento, hidrólise e fermentação, afetando o rendimento e consumo energético (Zhou; Yan, 2024), além de gerar dificuldades operacionais na moagem e fermentação (Nogueira *et al.*, 2023), refletindo no aumento do OPEX (Karimi; Simsek; Kheiralipour, 2025). O CAPEX e OPEX de indústrias *full* (apenas milho) são, respectivamente, 2,55 e 1,86 R\$/L·ano por capacidade instalada de produção, e considerando produção nacional de 8,2 bilhões de litros na safra 2024/2025 (UNICA, 2025), o investimento nacional seria em torno de R\$ 20,9 (CAPEX) e 15,3 bilhões (OPEX), com PBP de 6–8 anos (EPE, 2024), e TIR de 14,8 % (SCA BRASIL, 2025). A EROI (*Energy Return on Investment* – energia retornada sobre investida) pode atingir valores próximos de 3:1 (Renewable Fuels Association, 2022), indicando o potencial energético da cadeia. O preço do milho, responsável por 50 a 70 % do OPEX (Sampaio; Assis, 2023), é o

principal desafio, impactando o PMV e a viabilidade da planta, além dos custos de energia térmica e elétrica (Silva *et al.*, 2020), reforçando a importância da análise de sensibilidade. As principais limitações estão na falta de dados do Maranhão e na validação em condições reais, reforçando a contribuição deste trabalho para ampliar a base técnica.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

A produção de etanol de milho possui balanço de massa consistente, com geração de etanol e coprodutos, reforçando o potencial de aproveitamento integral da matéria-prima. O estudo se enquadra em TRL (*Technology Readiness Level* – Nível de Maturidade Tecnológica) 2, etapa de formulação conceitual, sem validação experimental, fundamentado em dados de mercado, custos e disponibilidade de matéria-prima. Os principais parâmetros de EHS (*Environment, Health, and Safety* – Meio Ambiente, Saúde e Segurança) incluem o consumo de água, emissões atmosféricas e gestão de resíduos com reaproveitamento energético, além do manuseio seguro de substâncias químicas e operações térmicas, mitigados por engenharia de segurança e monitoramento assertivo. Este trabalho avalia a escalabilidade da produção de etanol de milho sob enfoque técnico-econômico, integrando balanços de massa e energia à análise econômica para avaliar a viabilidade econômica e sensibilidade dos custos operacionais. Além disso, apoia a viabilidade do processo no Maranhão, oferecendo subsídios iniciais para pesquisas específicas para o Estado.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos 6–12 meses, serão finalizadas as coletas de dados técnicos da literatura e industriais para avaliação técnico-econômica, montagem de planilha de cálculos no *software Microsoft Excel* e caracterização do milho (composição).

Referências Essenciais

- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Investimentos e custos operacionais e de manutenção no setor de biocombustíveis: 2025-2034. Rio de Janeiro, 2024.
- HUMBIRD, D. *et al.* Process Design and Economics for the Production of Fuel Ethanol from Corn. NREL, 2011.
- KARIMI, M.; SIMSEK, H.; KHEIRALIPOUR, K. Advanced biofuel production: A comprehensive techno-economic review of pathways and costs. **Energy Conversion and Management**: X, v. 25, 2025.
- KWIATKOWSKI, J. R. *et al.* Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. **Industrial Crops and Products**, v. 23, p. 288–296, 2006.
- NOGUEIRA, L. C. *et al.* Avaliação do processamento de três híbridos de milho na produção de etanol. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, 2023.
- OLIVEIRA, L. S. B. L.; CRUZ, A. J. G. Techno-economic analysis and carbon intensity of sugarcane-corn flex plants in Brazil. **Bioresource Technology Reports**, v. 24, 2023.
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. Analysis shows corn ethanol's energy balance is strongly positive and continues to improve. Advanced BioFuels USA, 2022. Disponível em: <https://advancedbiofuelsusa.info/analysis-shows-corn-ethanols-energy-balance-is-strongly-positive-and-continues-to-improve>
- SAMPAIO, C.; ASSIS, D. R. Etanol de milho: novas perspectivas no mercado brasileiro. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, SP, v. 20, n. 2, p. 751–761, 2023.
- SALLA, D. A.; FURLANETO, F. P. B. Estudo energético da produção de biocombustível a partir do milho. *Energetic study of ethanol production from the corn crops*. **Engenharia Agrícola**, 2010.
- SILVA, H. J. T. *et al.* Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 29, n. 4, p. 142–159, 2020.
- SCA BRASIL. Etanol de milho pode atingir 40% da oferta total do biocombustível até 2028-2029, diz BTG, 2025. Disponível em: <https://scabrasil.com.br/etanol-de-milho-pode-atingir-40-da-oferta-total-do-biocombustivel-ate-2028-2029-diz-btg>
- TURTON, R. *et al.* Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes. 5. ed. Boston: Pearson, 2018.
- UNEM – União Nacional do Etanol de Milho, 2026. Disponível em: <https://etanoldemilho.com.br/produtos/>
- UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia. Ethanol The Sector, 2025. Disponível em: <https://unica.com.br/en/the-sector/ethanol/>
- ZHOU, J. Y.; YAN, S. D. A comprehensive review of corn ethanol fuel production: from agricultural cultivation to energy application. **Journal of Energy Bioscience**, v. 15, n. 3, p. 208–220, 2024.

IV WORKSHOP DO PRH-54 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

CARACTERIZAÇÃO TERMOFÍSICA DOS RESÍDUOS DO ALGODÃO PARA FINS ENERGÉTICOS

Maristella S. Monteles#1*; Antônio Carlos D. Freitas#2; Annamaria D. S. Vidotti#3;

****maristella.monteles@discente.ufma.br#1***

Resumo Executivo

A geração de grandes volumes de resíduos do algodão pela agroindústria impõe desafios ambientais e custos operacionais relacionados ao seu manejo e destinação. Este trabalho avalia o potencial energético a partir da caracterização termofísica do resíduo, visando integração energética. Os resultados demonstraram que os resíduos de algodão possuem baixo teor de umidade e cinzas, elevado teor de voláteis e poder calorífico, configurando propriedades favoráveis ao uso energético quando comparados às biomassas amplamente utilizadas na geração de energia, como o bagaço de cana-de-açúcar. Esses resultados reforçam o potencial do caroço de algodão como fonte energética alternativa, contribuindo para a valorização de resíduos agroindustriais e para a redução de custos energéticos no setor produtivo.

Palavra-chave: valorização de resíduos; processos termoquímicos; hidrogênio; biomassa; gaseificação.

Metodologia & Normas Técnicas

O potencial energético dos resíduos do algodão foi avaliado a partir de amostras coletadas em uma unidade agrícola localizada no município de Balsas–MA, visando avaliar sua viabilidade como matéria-prima em processos de conversão termoquímica, com destaque para a gaseificação em água supercrítica (Supercritical Water Gasification – SCWG). A metodologia consistiu na coleta, preparo físico e caracterização imediata e elementar da biomassa, de modo a fornecer dados para a avaliação do desempenho energético e para a modelagem termodinâmica. As amostras foram moídas em moinho de bolas (R-TE-350, Tecnal) por 30 minutos e submetidas à classificação granulométrica em peneirador eletromagnético por 20 minutos, resultando em duas frações: a fração retida em 45 mesh, com predominância de caroço de algodão, e a fração retida em 10 mesh, composta predominantemente por penugem de algodão. A análise imediata incluiu a determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, conforme procedimentos ASTM (ASTM D3172-13; ASTM D3173-11; ASTM D3174-12; ASTM D3175-20). A análise elementar (C, H, N e S) foi realizada em analisador CHNS (Vario Macro Cube), com o teor de oxigênio determinado por diferença. Todas as análises foram conduzidas em triplicata e os dados obtidos nesta etapa serão utilizados na modelagem termodinâmica do processo de gaseificação em água supercrítica.

Resultados & Discussão

Os resultados da caracterização dos resíduos do algodão evidenciam potencial para aplicação em processos industriais de gaseificação, com desempenho superior ao de biomassas consolidadas. Em comparação ao bagaço de cana-de-açúcar, a penugem do algodão apresentou aumento de 37,8% no teor de umidade, porém exibiu acréscimo de 25,17% no teor de voláteis, redução de 33,6% no teor de cinzas e incremento de 27,2% no poder calorífico superior. O caroço do algodão também apresentou aumento de 106,9% na umidade, acompanhado de acréscimo de 16,3% no teor de voláteis, redução de 43,0% no teor de cinzas e aumento de 16,6% no poder calorífico superior. Essas características indicam potencial para maior eficiência energética e propensão à formação de incrustações. As razões O/C são de 0,616 e 0,718 para penugem e caroço, respectivamente, valores inferiores ao bagaço de cana-de-açúcar, indicando maior densidade energética e melhor desempenho esperado em processos de gaseificação.

(Demirbas, 2002). De forma geral, os resíduos do algodão apresentam desempenho energético competitivo em relação às biomassas já consolidadas na indústria, reforçando seu potencial para geração de energia e produção de hidrogênio. Os resultados referem-se à análise elementar e imediata da biomassa, sendo necessárias análises complementares, como DRX (Difração de Raio X), FTIR (Espectroscopia no Infravermelho por Transformadas de Fourier) e DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial) e simulação do processo de gaseificação em água supercrítica (SCWG) para avaliar estrutura, reatividade e potencial energético da produção de hidrogênio.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Os resultados indicam que os resíduos do algodão apresentam alto potencial energético, com alto poder calorífico superior e baixo teor de cinzas, superando biomassas tradicionalmente utilizadas na indústria, como bagaço de cana-de-açúcar. O projeto encontra-se em TRL 3–4, caracterizado pela prova de conceitos e validação experimental em nível laboratorial (Mankins, 1995). O avanço para níveis superiores requer simulações termodinâmicas e outras análises, visando avaliar desempenho energético e a produção de hidrogênio. Sob a perspectiva de Environment, Health and Safety (EHS), o desenvolvimento do projeto está alinhado aos requisitos das normas ISO 14001:2015, uma vez que a proposta contribui para a redução de passivos ambientais, por meio da valorização de resíduos, sem introduzir novos riscos à saúde ocupacional ou à segurança operacional, pois as atividades são realizadas em ambiente controlado e em estágio inicial de desenvolvimento tecnológico. O scale-up é potencialmente viável mediante estudos de balanço de massa e energia, dimensionamento de equipamentos e integração com sistemas industriais.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos 6–12 meses, o projeto avançará para a consolidação técnica da aplicação energética dos resíduos do algodão, com foco na gaseificação em água supercrítica. Serão realizadas simulações termodinâmicas do processo para estimar rendimentos gasosos, produção de hidrogênio e eficiência energética em diferentes condições operacionais. Paralelamente, serão conduzidas análises complementares de caracterização da biomassa, incluindo DRX, FTIR e DSC, com o objetivo de compreender o comportamento termoquímico. Em seguida, serão avaliados cenários operacionais e comparado o desempenho dos resíduos do algodão com biomassas convencionais. Ao final do período, serão elaborados e entregues relatórios com os resultados e indicadores de desempenho. Caso os resultados sejam favoráveis, o estudo servirá de base para o desenvolvimento e dimensionamento de sistemas de gaseificação em escala piloto.

Referências Essenciais

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3172-13: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3173-11: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3174-12: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3175-20: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, 2020.

DEMIRBAS, Ayhan. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Exploration & Exploitation*, v. 20, n. 1, p. 105–111, 2002

ISO 14001:2015 — *Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. Geneva, 2015.
MANKINS, John C. et al. Technology readiness levels. 1995.

IV WORKSHOP DO PRH-54
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

MODELAGEM TERMODINÂMICA POR MAXIMIZAÇÃO DE ENTROPIA: VALIDAÇÃO DO ALGORITMO MAXS NO SOFTWARE LIVRE TES APLICADO À SCWG DA BIOMASSA

Lucas Pinheiro dos Reis; Annamaria Dória Souza Vidotti; Antonio Carlos Daltro de Freitas.*

**Email: lp.reis@discente.ufma.br*

RESUMO EXECUTIVO

A gaseificação em água supercrítica (SCWG) é uma rota estratégica para valorização de biomassas úmidas, permitindo elevada produção de hidrogênio sem etapa de secagem, porém a ausência de ferramentas abertas e robustas limita sua aplicação industrial. Este trabalho desenvolve e valida computacionalmente o TeS, um software livre em Python baseado na maximização da entropia (MaxS) para cálculo de equilíbrio químico multicomponente em SCWG. O modelo foi comparado com dados experimentais clássicos, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,97 e erros absolutos médios inferiores a 0,03 (fração molar) para H_2 e CO_2 . A implementação de uma correção entálpica (ΔH_{corr}) permitiu representar reatores isotérmicos utilizando o modelo maxS. Os resultados demonstram potencial direto de aplicação na avaliação termoquímica de biomassas amazônicas e na integração futura com módulos de otimização e machine learning.

Palavras-chave: gaseificação supercrítica; equilíbrio químico; maximização da entropia; modelagem termodinâmica; hidrogênio.

RELEVÂNCIA INDUSTRIAL

A SCWG é uma alternativa relevante para produção de biocombustíveis por converter diretamente resíduos úmidos. Porém, a falta de ferramentas abertas e confiáveis para prever rendimento de H_2 e balanços energéticos ainda limita sua adoção em maior escala. O TeS supre essa lacuna como simulador reproduzível e sem custo de licença, apoiando projeto, triagem de matérias-primas e seleção de condições operacionais proporcionando escalabilidade operacional. Além disso, o uso de MaxS reduz o custo computacional (tempos computacionais inferiores a 5 segundos) ao conciliar ferramentas de otimização robustas pelo solver IPOPT e técnicas de modelagem multivariáveis.

METODOLOGIA & NORMAS TÉCNICAS

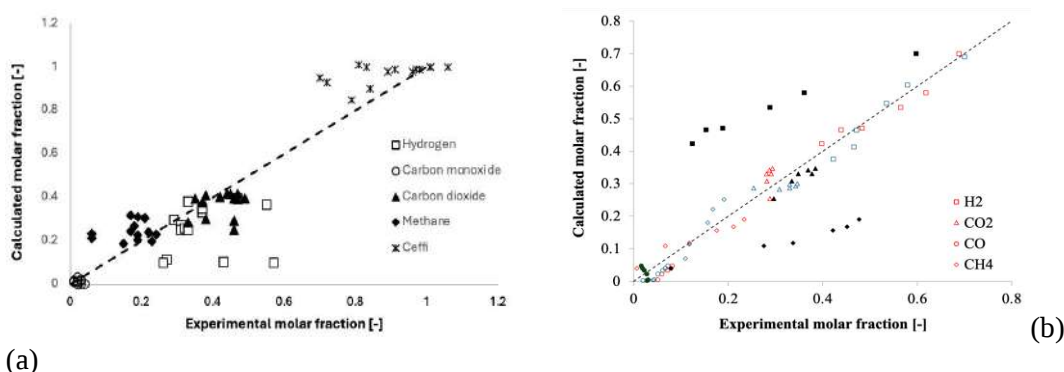
O modelo *MaxS* baseia-se na formulação de equilíbrio termodinâmico não-estequiométrico, aplicando o balanço elementar e a maximização da entropia total sob restrições de não negatividade do número de mols e balanço atômico, conforme descrito em Freitas e Guirardello [1]. O algoritmo, implementado em *Python* com rotinas de otimização da biblioteca *SciPy* e um banco próprio de propriedades termodinâmicas padrão. O software foi validado comparando previsões de composições molares e frações de gases (H_2 , CO_2 , CH_4 , CO) com dados experimentais de Antal et al. [2] para SCWG de diferentes biomassas (resíduo de milho, serragem, amido e resíduos de batata), com dados a pressão de 28 MPa e temperaturas entre 900 e 1073 K. Também foram avaliados os resultados de Byrd et al. [3] e Castello e Fiori [4] para gaseificação de glicerol entre 600–800 °C e 25 MPa. Como os dados de reatores adiabáticos, correspondentes às condições do modelo, são escassos foram utilizados reatores isotérmicos. Para suprir essa variação, foi aplicada uma correção entálpica (ΔH_{corr}) iterativa para ajustar a temperatura de equilíbrio (T_{eq}) até a convergência do balanço de energia pela equação a seguir: $\sum_i n_i h_i(T_{eq}) = \sum_j n_j h_j(T_0) + \Delta H_{corr}$. Para correção das não idealidades, a equação de estado de Peng-Robinson foi utilizada em todas as simulações realizadas nesse trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 ilustra a comparação entre os resultados experimentais e as previsões do modelo MaxS em uso direto para os dados experimentais de Antal (Figura 1(a)) e para a versão com ΔH_{corr} para os dados experimentais de Byrd

[3] e os simulados por Castello e Fiori [4] (Figura 1 (b)). O modelo MaxS reproduziu com alta fidelidade as tendências experimentais de gaseificação, apresentando R^2 superiores a 0,97 (considerando todo o conjunto de dados) para frações molares de H_2 e CO_2 e erros absolutos médios (MAE) inferiores a 0,03 (para a fração molar) em relação aos dados de Byrd [3] e Castello e Fiori [4] (somando 19 dados experimentais e totalizando 76 pontos nos dois gráficos). A introdução do termo ΔH_{corr} no balanço de entalpia aprimorou significativamente a concordância entre os dados, sendo possível verificar essa diferença ao avaliar a Figura 1 (b), entre os dados pretos (sem correção) e os dados em azul (utilizando a correção entálpica). Os resultados corroboram que o solver IPOPT combinado com o modelo MaxS e o software livre TeS se mostram como ferramentas importantes para aplicações no estudo de comportamento operacional/reacional em sistemas de gaseificação de biomassa, especialmente em sistemas reacionais SCWG.

Figura 1. Comparação entre resultados experimentais e simulados da literatura com as simulações realizadas no software TeS. (a) frações molares experimentais de Antal et al. (2000) para reator com troca térmica, com os valores calculados pelo modelo MaxS sem correção; (b) frações molares experimentais e de equilíbrio para os principais gases formados na SCWG, dados experimentais isotérmicos de Byrd et al. (2007) e os simulados por Castello e Fiori (2014).



Legenda: ● MaxS corrigido (TeS), ● Simulados de Castello e Fiori (MinG) e ● MaxS sem correção.

Fonte: Autor(2026)

CONCLUSÕES, TRL & ESCALABILIDADE

A ferramenta encontra-se em TRL 3–4, com validação computacional frente a dados experimentais da literatura. A escalabilidade está associada à integração futura com modelos cinéticos e balanços de processo para plantas piloto. Do ponto de vista de EHS, o uso do TeS contribui para avaliação prévia de condições seguras de operação em altas pressões e temperaturas, além de apoiar análises de sustentabilidade ao estimar eficiência energética e potencial de redução de emissões de carbono.

PRÓXIMOS PASSOS

Nos próximos 6–12 meses, o trabalho irá ampliar a validação do TeS comparando H_2 experimental e simulado para diferentes biomassas, realizando análises por meio de validação com dados experimentais e testes de escalabilidade da rota tecnológica. Em seguida, será implementado e validado sistematicamente o modelo MaxS, avaliando sua aderência aos dados e sua sensibilidade a temperatura, pressão, razão biomassa/água e composição elementar. Análises acerca do comportamento térmico dos processos e sua análise energética serão conduzidos. Paralelamente, será estruturada uma base termodinâmica de biomassas amazônicas conforme normas ASTM para integração ao software TeS. Ao final, espera-se liberar uma versão consolidada do módulo MaxS e curvas comparativas H_2 experimental $\times$ simulado, definindo janelas de maior confiabilidade para aplicações em rotas SCWG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Freitas, A.C.D., Guirardello, R. International Journal of Hydrogen Energy, 39(31), 17969-17984, 2014.
- [2] Antal, M.J., Allen, S.G., Schulman, D., Xu, X., Divilio, R.J. Ind. & Eng. Chem. Res., 39(11), 4040–4053, 2000.
- [3] Byrd, A.J., K.K. Pant, Ram B. Gupta. Fuel, 87 (14), 2956-2960, 2008.
- [4] Castello, D. Fiori, L. Bioresource Technology, 102(16), 7574-7582, 2011.

IV WORKSHOP DO PRH-54 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

PIRÓLISE DE BIOMASSAS DA AMAZÔNIA LEGAL: SIMULAÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS

Eduardo Santos Figueiredo#1; Nahieh Toscano Miranda#2

***es.figueiredo@discente.ufma.br**

Resumo Executivo

A transição energética impõe a necessidade de diversificar rotas para produção de biocombustíveis de baixo carbono. Nesse sentido, a Amazônia Legal possui um vasto potencial energético de resíduos ainda subutilizados. Com isso, este trabalho investiga a valorização termoquímica dos resíduos de babaçu, buriti e macaúba por meio da pirólise, visando à produção de biocombustíveis. A metodologia combina a caracterização das biomassas com simulações no software COCO (CAPE-OPEN to CAPE-OPEN) e ensaios experimentais, visando identificar parâmetros operacionais favoráveis e prever rendimentos das frações sólida (*biochar*, biocarvão vegetal), líquida (bio-óleo) e gasosa. O estudo pretende demonstrar que o aproveitamento desses resíduos pode oferecer uma alternativa energética sustentável, reduzir impactos ambientais e fortalecer a bioeconomia regional.

Palavras-chave: pirólise; Amazônia Legal; biocombustíveis; COCO Simulator; babaçu, buriti; macaúba.

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

O estudo compara o potencial de pirólise dos resíduos de babaçu, buriti e macaúba. As biomassas passam por pré-tratamento físico (secagem, moagem e peneiramento – ASTM E1757 e ASTM E1756) e por caracterizações físico-químicas para fornecer propriedades como parâmetros de entrada do simulador: análises elementar e imediata (ASTM D3174), caracterização lignocelulósica e poder calorífico superior (ASTM D5865). A pirólise será conduzida em um forno tubular vertical piloto (*Drop Tube Furnace* – DTF), modelo FT 1200/V/E (*Maitec*), a 0,5 g.min⁻¹, com nitrogênio (1,5 a 2,0 L.min⁻¹), por 20 minutos, com planejamento experimental, avaliando temperatura, umidade, granulometria e vazão do gás, coletando apenas o *biochar*. Paralelamente, simulações no COCO, fundamentadas em modelos cinéticos reportados na literatura, permitirão prever e comparar a distribuição dos produtos.

Resultados & Discussão

As biomassas da Amazônia Legal apresentam propriedades favoráveis à pirólise devido à estrutura lignocelulósica, apresentando similaridade composicional de celulose (22,15 – 69,64 %), hemicelulose (10,73 – 34,11 %) e lignina (11,79 – 39,80 %) (Santana Junior *et al.*, 2020; Rodrigues *et al.*, 2018; Guimarães *et al.*, 2021; Rencoret *et al.*, 2018) entre diferentes partes das biomassas, embora variações possam impactar a distribuição dos produtos, reforçando a importância da caracterização. As variações de celulose ocorrem no buriti e macaúba, com maiores concentrações no caroço ou no epicarpo. O babaçu apresenta o maior teor de hemicelulose em comparação às demais. Estudos já demonstraram a influência da composição das biomassas na distribuição dos produtos e a necessidade de planejamento experimental: pirólise lenta de babaçu a 500 °C apresenta *biochar* e bio-óleo equilibrados (~ 30 %) (Pires *et al.*, 2023) e o rendimento de *biochar* de macaúba diminui de ~ 40 a 20 % de 400 a 600 °C, respectivamente (Nascimento *et al.*, 2025). O uso do reator DTF é respaldado por Cruz (2015). A simulação permite prever o comportamento termoquímico, corroborada por estudos (Hasan *et al.*, 2022; Jaroenphasemmesuk *et al.*, 2023), e o simulador já permitiu identificar análises de sensibilidade que serão realizadas, inviáveis em escala experimental.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Os resíduos de babaçu, buriti e macaúba apresentam composição lignocelulósica favorável à produção de biocombustíveis. A combinação de simulação e experimentação demonstra-se promissora, permitindo identificar condições operacionais favoráveis. O projeto encontra-se em TRL (*Technology Readiness Level* – Nível de Prontidão

Tecnológica) 2 (conceito da tecnologia e aplicação formulados), aproximando-se do 3 (prova de conceito experimental), com a definição da rota de pirólise e início das simulações, caracterizações e testes experimentais. A conclusão dessas etapas permitirá alcançar o TRL 4 (validação em laboratório) e com a obtenção de dados experimentais, pode-se alcançar o TRL 6. Do ponto de vista de EHS (*Environment, Health, and Safety* – Meio Ambiente, Saúde e Segurança), a rota proposta não adiciona riscos químicos e ainda oferece redução de passivos agroindustriais e potencial sequestro de carbono. A simulação permitirá estimar preliminarmente o comportamento do processo em escala industrial. Os dados obtidos no reator permitirão gerar correlações empíricas representativas.

Próximos Passos

Entre os meses 1 e 3, serão concluídas as etapas de preparação e caracterização físico-química, gerando dados para o simulador e definindo parâmetros do planejamento experimental. Até o mês 9, ocorrerão as simulações e os testes experimentais em paralelo, permitindo comparar as biomassas e identificar condições operacionais ótimas. Nos meses 9–12, será realizado o tratamento dos dados e a elaboração do relatório técnico.

Agradecimentos

Ao PRH-ANP 54/UFMA, pelo suporte técnico e financeiro, à FAPESP pela gestão e ao Laboratório GERATA/NARP pela infraestrutura disponibilizada.

Referências Essenciais

- ASTM International. **ASTM E1756-08(2020)**: Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.
- ASTM International. **ASTM E1757-19**: Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.
- ASTM International. **ASTM D3174-12(2018)e1**: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- ASTM International. **ASTM D5865/D5865M-19**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- CRUZ, G. Características físico-químicas de biomassas lignocelulósicas e a correlação entre suas emissões e os resíduos gerados sob diferentes condições atmosféricas em um forno tubular de queda livre (DTF). Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- GUIMARÃES, M. G. *et al.* Green energy technology from buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) for Brazilian agro-extractive communities. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 3, 2021.
- HASAN, M. M. *et al.* Modeling and process simulation of waste macadamia nutshell pyrolysis using Aspen Plus software. **Energy Reports**, v. 8, p. 429–437, 2022.
- JAROENKHAEMMEESUK, C. *et al.* Improved simulation of lignocellulosic biomass pyrolysis plant using chemical kinetics in Aspen Plus® and comparison with experiments. **Alexandria Engineering Journal**, v. 63, p. 199–209, 2023.
- NASCIMENTO, D. C. *et al.* Macauba (*Acrocomia aculeata*) as a Bioenergy Platform: Integrated Biodiesel Production and Lignocellulosic Biomass Valorization. **ACS Omega**, v. 10, n. 51, p. 63608–63619, 2025.
- PIRES, P. S. *et al.* Socioeconomic analysis of bioproducts derived from babassu nut breakers pyrolysis in legal amazonia communities. **Food Science and Technology**, v. 43, 2023.
- RENCORET, J. *et al.* Variability in Lignin Composition and Structure in Cell Walls of Different Parts of Macaúba (*Acrocomia aculeata*) Palm Fruit. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 1, p. 138–153, 2018.
- RODRIGUES, P. R. *et al.* Evaluation of buriti endocarp as lignocellulosic substrate for second generation ethanol production. **PeerJ**, v. 6, 2018.
- SANTANA JUNIOR, C. C. *et al.* Environmental-economic assessment of lignocellulosic residual from the Legal Amazon for conversion in biochars and bioproducts for biorefineries. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 7, n. 8, p. 324–337, 2020.

IV WORKSHOP DO PRH-54
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃODESENVOLVIMENTO DE PROCESSO FOTOCATALÍTICO PARA OBTENÇÃO DE DIESEL
VERDE VIA DESCARBOXILAÇÃO

Ítalo R.F.C. Cardoso*; Rafaely N. Lima

*rodrigo.italo@discente.ufma.br

Resumo Executivo

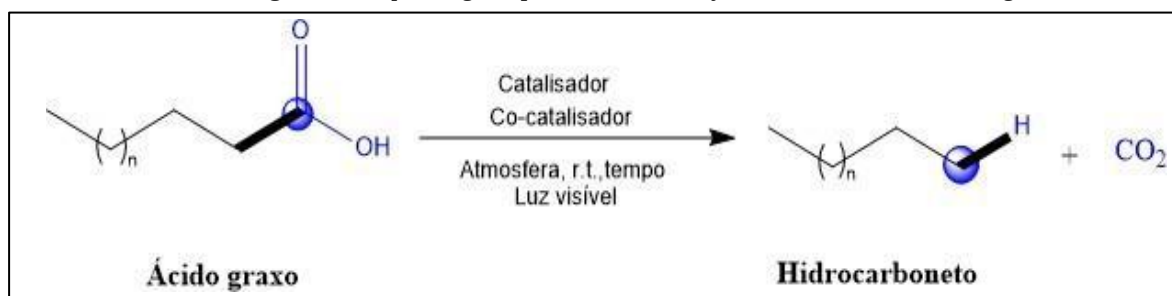
A indústria de combustíveis enfrenta o desafio de conciliar a produção de energia com a urgência em reduzir as emissões de dióxido de carbono. Embora o biodiesel misturado ao diesel fóssil reduza a emissão de CO₂, sua eficiência é limitada pela baixa estabilidade térmica e oxidativa, além de afetar a integridade do motor devido ao alto teor de oxigênio. O hidrotreatamento de óleos vegetais surge como alternativa para obter hidrocarbonetos (diesel renovável), mas exige condições extremas de temperatura e pressão, além de alto consumo de hidrogênio, o que compromete a sustentabilidade global do processo. Em contrapartida, a descarboxilação fotocatalítica de ácidos graxos permite obter produtos similares sob condições brandas, consolidando-se como uma área promissora. Nesse cenário, propõe-se o desenvolvimento de um processo fotocatalítico heterogêneo para a produção de hidrocarbonetos renováveis na faixa do diesel, via descarboxilação de ácidos graxos provenientes do óleo de Ariri.

Palavras-chave: diesel verde; descarboxilação; fotocatalise; biocombustíveis; hidrocarbonetos.

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

A metodologia proposta para o processo de obtenção de hidrocarbonetos renováveis via descarboxilação fotocatalítica heterogênea consistirá em empregar o ácido láurico como reagente controle (principal componente do óleo de Ariri), para avaliar a melhor condição reacional (catalisador, estequiometria, atmosfera e aditivos) da obtenção do hidrocarboneto correspondente. As reações serão realizadas em caixas de fotocatalise sob luz visível e sob agitação constante. As reações-controle permitirão encontrar a condição de maior rendimento e taxa de conversão. A Figura 1 permite compreender como se processará a reação de descarboxilação fotocatalisada.

Figura 1- Esquema geral para descarboxilação fotocatalítica de ácidos graxos



Fonte: próprio autor.

Uma vez determinada a melhor condição reacional, o processo será expandido para uma mistura complexa de ácidos graxos com cadeias carbônicas na faixa do diesel, provenientes do óleo vegetal de Ariri. As análises de rendimento e identificação dos produtos na mistura reacional serão feitas através de cromatografia gasosa e espectrometria de massas (CG-EM), por meio da análise de padrões analíticos.

Resultados & Discussão

Até o momento, há poucos relatos na literatura que abordam a descarboxilação fotocatalítica de ácidos alifáticos com foco em aplicações como biocombustíveis (Azevedo et al., 2024; Araujo et al., 2023; Araujo et al., 2025). Alguns estudos serviram como base conceitual para esses trabalhos, em especial aqueles desenvolvidos por Nicewicz (2015), Li (2022) e Liao (2020), que demonstraram sucesso na hidrodescarboxilação de ácidos graxos aril-substituídos via catálise fotoredox, incluindo exemplos pontuais de ácidos alifáticos em seus escopos. Inspirados por esses trabalhos, bem como pelos estudos conduzidos pelo grupo de Cavalcanti, propõe-se neste estudo a aplicação da fotocatalise heterogênea para a descarboxilação de ácidos graxos, abordagem ainda pouco explorada, ao nosso conhecimento, uma vez que os métodos reportados na literatura baseiam-se predominantemente em sistemas catalíticos homogêneos.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Estudos preliminares demonstraram o potencial da utilização da fotocatalise para a produção de combustíveis drop-in, semelhantes ao fóssil, mas originados da biomassa. O desenvolvimento de um método de baixo custo operacional, como a proposta apresentada no presente resumo, permite superar as limitações do biodiesel resultando na utilização direta do diesel verde. Ademais, a descarboxilação fotocatalítica heterogênea apresenta-se vantajosa frente a processos como o hidrotreatamento de óleos vegetais, visto que pode ser realizada em condições brandas de temperatura e pressão e sem o uso excessivo de hidrogênio e com possibilidade de reuso do catalisador. Atualmente, a tecnologia se encontra em TRL 3 (prova de Conceito Laboratorial), com a validação da rota de descarboxilação em escala de bancada. Embora o baixo custo operacional seja um atrativo, a viabilidade econômica em larga escala dependerá da estabilidade do catalisador e da sua capacidade de reuso em ciclos sucessivos com óleos reais (como o de Ariri), que possuem maior complexidade molecular que o padrão de ácido láurico utilizado como reagente modelo.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos 6-12 meses, o foco será encontrar as melhores condições reacionais de descarboxilação para o ácido graxo padrão. Tal etapa é essencial antes de realizar as reações diretamente com a biomassa, visto que é possível controlar e mapear os possíveis mecanismos envolvidos. A síntese e caracterização dos catalisadores também serão realizados nessa etapa, visto que a eficiência da descarboxilação fotocatalítica é estritamente dependente da banda de energia (*band gap*) e da área superficial do material. A compreensão das propriedades estruturais e eletrônicas do catalisador permitirá correlacionar sua atividade com a seletividade para hidrocarbonetos lineares, minimizando reações secundárias de craqueamento ou polimerização que poderiam comprometer a qualidade do diesel verde obtido.

Agradecimentos

Nossos agradecimentos à UFMA e ao NCCA pelo apoio institucional e técnico. Agradecemos especialmente à ANP, ao PRH-54 e à FAPESP pelo financiamento, pela confiança no projeto e pela organização exemplar. O apoio dessas instituições foi determinante para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Essenciais

- BRASIL. Brasil. Ministério de Minas e Energias. **Sobre o RenovaBio**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/sobre-o-renovabio>. Acesso em: 30 set. 2025.
- NICEWICZ, David A. et al. Hydrodecarboxylation of Carboxylic and Malonic Acid Derivatives via Organic Photoredox Catalysis: substrate scope and mechanistic insight. (**ACS**), [S.L.], v. 137, n. 35, 28 ago. 2015.
- DE AZEVEDO, Amanda M. et al. Photocatalyzed hydrodecarboxylation of fatty acids: a prospective method to produce drop-in biofuels. *RSC advances*, v. 14, n. 15, p. 10755-10760, 2024.
- CAO, Tianpeng et al. Decarboxylative thiolation of redox-active esters to free thiols and further diversification. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 5340, 2020.
- SUN, Yuan-Li et al. Visible-Light Photoredox-Catalyzed Hydrodecarboxylation and Deuterodecarboxylation of Fatty Acids. **Chinese Journal of Chemistry**, v. 40, n. 16, p. 1903-1908, 2022.

IV WORKSHOP DO PRH-54
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃOAVALIAÇÃO DO IMPACTO DO PREÇO DO CARBONO NO MERCADO DE
ENERGIA ELÉTRICAVinicius Azevedo Silva*; Vicente Leonardo Paucar
vinicius.as@discente.ufma.br

Resumo Executivo

A descarbonização do setor elétrico submete o setor a volatilidades tarifárias acentuadas, sobretudo em sistemas hidrotérmicos. No Brasil, o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024, tende a internalizar o custo de CO₂ no despacho, mas ainda faltam métricas do impacto no Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). Este trabalho, etapa preparatória de dissertação sobre previsão do preço spot com inteligência artificial (IA), estima o repasse (pass-through) do custo de carbono ao preço da eletricidade por modelagem econométrica comparada (Europa e Califórnia) e simula o contrafactual do Sistema Interligado Nacional (SIN) sob diferentes preços de carbono e níveis de Energia Armazenada nos Reservatórios (EAR). O coeficiente de repasse (β) europeu situa-se entre 0,40 e 0,80; na Califórnia, o efeito é condicionado ao despacho térmico ($\beta = 0,89$; p-valor = 0,034); e o PLD eleva-se em média +R\$ 119/MWh (+87%) para custo de carbono de USD 50/tCO₂.

Palavras-chave: precificação de carbono; repasse (pass-through); Preço de Liquidação das Diferenças (PLD); simulação contrafactual; mercado de eletricidade

Metodologia & Normas Técnicas

A investigação segue três frentes sequenciais — (i) coleta e padronização de dados, (ii) estimação econométrica e (iii) simulação contrafactual — alinhadas à literatura sobre acoplamento eletricidade-carbono e transmissão de preços (AATOLA; OLLIKAINEN; TOPPINEN, 2013; WOO et al., 2018; ZHANG, H. et al., 2024; LI et al., 2023; WU et al., 2026). A quantificação de emissões adota princípios de rastreabilidade compatíveis com a série ABNT NBR ISO 14064. Para a etapa empírica europeia, estima-se um modelo de painel com efeitos fixos por país ($n = 1.411$, 31 países $\times$ 47 meses) e interação carbono $\times$ participação fóssil, com erros-padrão clusterizados por país. Para a Califórnia, emprega-se OLS com correção de Newey–West para heterocedasticidade e autocorrelação ($n = 48$) e interação CCA $\times$ regime de alta demanda térmica. Na etapa Brasil, o custo de CO₂ é internalizado no CVU via equação (1) e o repasse ao PLD é simulado para o submercado SE/CO sob diferentes níveis de EAR, respeitando piso/teto regulatórios.

$$CVU^* = CVU + FE \times PCO_2 \times \text{câmbio} \quad (1)$$

Onde FE (tCO₂/MWh) é o fator de emissão marginal, PCO₂ (USD/tCO₂) é o preço do carbono, câmbio (R\$/USD) e CVU (R\$/MWh). Aplicam-se as travas regulatórias de PLD mínimo (R\$ 69,04) e máximo (R\$ 684,00/MWh). A incerteza é quantificada via Monte Carlo ($n = 2.000$ realizações). Fontes: Ember, ICAP, CCEE e ONS.

Resultados & Discussão

A Tabela 1 sintetiza os coeficientes de pass-through. Na Europa, $\beta_1 = 0,40$ ($p < 0,01$) com interação positiva $\beta_2 = 0,79$ ($p < 0,003$): o repasse cresce de 0,56 em países hidrelétricos a 0,80 em economias dependentes de gás. Na Califórnia, o resultado incondicional é nulo ($\beta \approx 0$; $p = 0,92$), porém a interação CCA $\times$ alta demanda revela $\beta = 0,89$ ($p = 0,034$): o carbono só repassa quando usinas a gás fixam o preço marginal (ELSAYED et al., 2025).

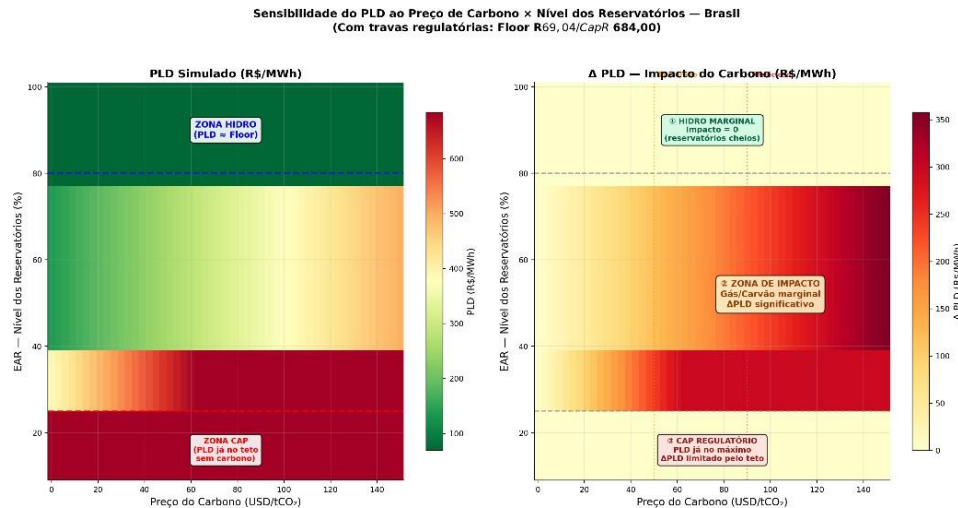
Tabela 1 — Coeficientes de *pass-through* do preço do carbono ao preço da eletricidade.

Mercado	Método	β (PT)	p-valor	n	Unidade	IC 95% / P5–P95
EU (base)	Painel FE	0,400	0,010	1.411	USD/MWh	[0,10; 0,70]
EU (Gas-Heavy)	Cluster FE	0,799	<0,001	705	USD/MWh	[0,50; 1,10]
EU (Low-Carbon)	Cluster FE	0,583	<0,001	706	USD/MWh	[0,41; 0,76]
CA (incondicional)	OLS NW	−0,050	0,921	48	USD/MWh	[−1,06; 0,96]
CA (alta demanda)	Interação	0,887	0,034	48	USD/MWh	[0,11; 2,63]
BR (USD 50/tCO ₂)	Merit-order	A 119,3	n/a	2.000	USD/MWh	[158; 852] P5–P95

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o Brasil, a simulação contrafactual incorpora o preço do carbono ao custo variável das térmicas e propaga o choque ao PLD do submercado SE/CO sob diferentes níveis de Energia Armazenada nos Reservatórios (EAR). No cenário-base de USD 50/tCO₂, estima-se elevação média de +USD 23,9/MWh (+87%) no PLD, com forte não linearidade: i) em EAR elevado (zona hídrica), o impacto tende a zero; ii) em EAR intermediário, o repasse é expressivo quando gás/carvão são marginais; iii) em escassez hídrica, o efeito é limitado pelo teto regulatório. A Figura 1 sintetiza essa sensibilidade do PLD ao preço do carbono e ao EAR.

Figura 1 — Sensibilidade do PLD ao preço de carbono × nível dos reservatórios (EAR)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Conclusões, TRL & Escalabilidade

O impacto do carbono no preço da eletricidade é governado pela composição da matriz, pelo desenho institucional do mercado de carbono e, no caso brasileiro, pela condição hidrológica. A Europa exibe repasse robusto e heterogêneo; a Califórnia apresenta repasse condicional ao regime de despacho; o Brasil terá impacto modulado pelo EAR. A O desenvolvimento tecnológico situa-se em estágio de maturidade TRL 2-3 (formulação e validação inicial do conceito), tendo sido validada com dados reais e simulação computacional. O pipeline em Python processa de forma automatizada os dados de três jurisdições (CCEE, ONS, Ember, CAISO), sendo escalável para os parâmetros definitivos do SBCE. Os requisitos de rastreabilidade são atendidos pela ABNT NBR ISO 14064.

Próximos Passos (6–12 meses)

Os custos ambientais aqui quantificados serão integrados como variáveis de entrada (features de carbono) em modelos de Deep Learning (LSTM, Transformers, N-BEATS) para previsão de preços intradiários no mercado de energia elétrica. Os marcos incluem: (i) extensão da base de dados para frequência horária (DESSEM/CCEE); (ii) incorporação dos parâmetros definitivos do SBCE, tão logo sejam regulamentados; (iii) validação de modelos preditivos com janela deslizante, avaliando o ganho da inclusão do sinal de carbono frente a modelos-base sem essa variável. Pretende-se, ainda, expandir a análise para os demais submercados do SIN (S, NE, N) e investigar o efeito do carbono sobre a volatilidade do PLD. Entregáveis: artigo indexado e código-fonte aberto.

Referências

- AATOLA, P.; OLLIKAINEN, M.; TOPPINEN, A. Impact of the carbon price on the integrating European electricity market. **Energy Policy**, v. 61, p. 1236-1251, 2013.
- ELSAYED, A. H. et al. AI and carbon pricing in turbulent times. **International Review of Financial Analysis**, v. 107, e104632, 2025.
- LI, H. et al. Analytical model of the impact of carbon market on electricity market. In: **IEEE IAS I&CPS ASIA**, 2023.
- WOO, C. K. et al. Carbon trading's impact on California's real-time electricity market prices. **Energy**, v. 159, p. 579-587, 2018.
- WU, J. et al. Electric-carbon market coupling and price transmission mechanism in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 544, e147692, 2026.

IV WORKSHOP DO PRH-54
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**CONTROLADOR ÓTIMO PERIÓDICO DE ATITUDE E CALADO PARA PLATAFORMA SEMISSUBMERSÍVEL VIA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA ADAPTATIVA****Victor G. Furtado*; João V. da F. Neto*****victor.gf@discente.ufma.br****Resumo Executivo**

A realização de operações de perfuração e extração por plataformas semissubmersíveis demanda a adoção de um sistema de controle adequado, uma vez que tais estruturas apresentam elevada complexidade dinâmica, com aspectos críticos de estabilidade, segurança operacional, tempo de resposta e integridade estrutural, além de estarem sujeitas a grandes perturbações. Este trabalho propõe o desenvolvimento do projeto de um sistema de controle ótimo periódico adaptativo para a regulação de calado e atitude de plataformas semissubmersíveis utilizando a Programação Dinâmica Adaptativa (PDA), mais especialmente a Programação Dinâmica Heurística Dependente de Ação (ADHDP). Inicialmente, o controlador será desenvolvido em ambiente simulado, assim como a dinâmica da planta. Espera-se que a abordagem ADHDP aliada ao controle ótimo periódico torne o sistema de controle *online* de nível de tanque de lastro menos sensível às perturbações ambientais.

Palavras-chave: plataforma semissubmersível; controle ótimo periódico; PDA; ADHDP; perturbações ambientais

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

As plataformas semissubmersíveis estão sujeitas a grandes perturbações que induzem movimento de oscilação em toda a plataforma, elas alteram o calado e deslocam o centro de flutuabilidade ideal prejudicando a plena operação da plataforma. Por meio do sistema de coordenadas e notações usuais da área naval, essas oscilações são caracterizadas pela variação dos ângulos de rolagem (ϕ) e arfagem (θ), enquanto o calado é alterado pelo movimento de elevação. As inclinações indesejáveis são controladas pelo nível de água nos tanques de lastro para manter a estabilidade da plataforma mesmo em condições adversas (FORTES, 2006), como apresentado na Figura 1.

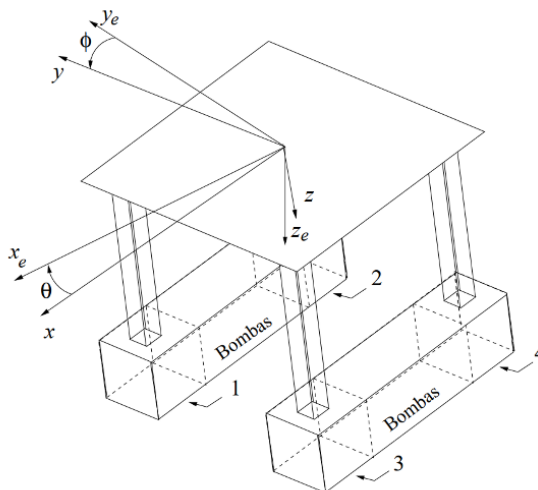


Figura 1 – Sistemas de coordenadas da plataforma semissubmersível (FORTES, 2006).

O controlador ótimo periódico será desenvolvido em ambiente virtual, sendo avaliado por meio de uma planta simulada baseada em um modelo matemático cujos parâmetros derivam de processos de identificação de sistemas consolidados na literatura. O controle periódico surge da ideia originada de observação de que em algumas situações

uma ação periódica melhora o desempenho de sistemas lineares invariantes no tempo (LTI). É verificado em Geromel e Colaneri (2026) que a presença de uma perturbação na saída medida necessita a implementação de um filtro na forma de observador, onde seu desempenho sobre a estimação da entrada de controle pode ser melhorado utilizando ganhos periódicos no *loop* de inovação. A ideia principal é a existência de um controlador linear periódico (C_h) com período $h \geq 2 \in N$, que supera o controlador ótimo LTI-H2 (GEROMEL; COLANERI, 2026). O projeto do controle consiste na definição do período ótimo h e posteriormente dos ganhos ótimos periódicos. O problema pode ser abordado como um problema de otimização convexa, convertido para o ambiente de desigualdade matricial linear (LMI) ou como sistemas periódicos lineares em tempo discreto. O controlador periódico linear pode ser interpretado como um controlador LTI com informação a priori sobre as saídas medidas (GEROMEL; COLANERI, 2026).

Os ganhos do filtro são os ganhos periódicos, cuja obtenção está condicionada à resolução de uma Equação de Riccati. Deseja-se calcular a solução de Riccati de forma *online* e implícita, através da ADHDP, como apresentado em (LEWIS; VRABIE; SYRMOS, 2012) e (FAN; XIONG, 2024).

Espera-se que a aplicação do controlador reduza a sensibilidade do sistema às perturbações ambientais externas. Os testes serão realizados utilizando JONSWAP para simular computacionalmente condições adversas e diversos cenários de avaliações. Em geral, o objetivo do controlador é garantir estabilidade residual fazendo com que inclinação da plataforma não exceda 17° , garantindo uma margem de segurança contra o emborcamento conforme o Código MODU (IMO, 2009).

Resultados & Discussão

Os resultados apresentados nesta seção são preliminares e baseiam-se em simulações computacionais pré-desenvolvimento pleno do controlador. Os primeiros testes realizados são realizados com o controlador ótimo *online* LTI-H2, onde se obteve a solução de Riccati por meio da ADHDP e a regulação dos estados do sistema para um valor nulo. Esse resultado indica a estabilização da plataforma em rolagem e arfagem mas não garante o controle de calado. Além disso, o controlador ainda não possui a estrutura periódica, este primeiro teste serve como comparativo para quando o controlador final for desenvolvido.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Os estudos preliminares de simulação indicam que o sistema integrado de controle de atitude e pode reduzir a influência de perturbações nos controladores ótimos já consolidados. Até o momento, a tecnologia encontra-se em TRL 2–3, com validação conceitual inicial e modelagem computacional em andamento, exigindo ainda implementações das demais etapas do controlador proposto.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos 6–12 meses, o foco do projeto será o desenvolvimento e a validação inicial do sistema ótimo periódico de forma offline com a problemática de atitude e calado. Posteriormente, o foco será a implementação do controlador de forma *online*.

Referências Essenciais

FAN, Wenwu; XIONG, Junlin. Q-learning methods for LQR control of completely unknown discrete-time linear systems. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024.

FORTES, Rafael Monteiro; DA CUNHA, José Paulo Vilela Soares. Modelagem da dinâmica e experimentos com uma plataforma semi-submersível em escala reduzida. In: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática. 2006. p. 1632 - 1637.

GEROMEL, José C.; COLANERI, Patrizio. Optimal Periodic Control of Discrete-Time LTI Systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 2026.

IMO. Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units (MODU Code), 2009 Edition. London: IMO Publishing, 2009.

LEWIS, Frank L.; VRABIE, Draguna; SYRMOS, Vassilis L. Optimal control. John Wiley & Sons, 2012.

IV WORKSHOP DO PRH-54 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Despacho de sistemas de potência híbridos com integração de usinas hidrelétricas reversíveis para redução de emissões de carbono

Clóvis da Conceição Melo Martins Júnior; V. Leonardo Paucar; R. N. D. Costa Filho*

**junior.clovis@discente.ufma.br*

Resumo Executivo (100–150 palavras)

Os sistemas de energia elétrica modernos apresentam complexidade crescente, elevando a complexidade dos métodos de otimização empregados. Esta pesquisa sintetiza a solução para a coordenação hidrotérmica em sistemas híbridos, com integração de usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) e otimizando custos e emissões frente à variabilidade eólica. Utilizando técnicas de Deep Learning, destaca-se a inovadora rede Kolmogorov-Arnold (KAN) por sua maior interpretabilidade. A integração estratégica gera ganhos expressivos: economia média de US\$ 97.165,03/dia e redução de 777,32 tCO₂/dia nas emissões. O modelo DFF destaca-se pela eficiência computacional, enquanto a KAN oferece a auditabilidade necessária para o setor elétrico. A metodologia consolida uma ferramenta robusta para a descarbonização e o planejamento operacional eficaz.

Palavras-chave: sistemas híbridos; coordenação hidrotérmica; otimização; redes neurais artificiais; UHR;

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

A metodologia fundamenta-se na formulação de um problema de despacho econômico e de baixo carbono representativo da operação diária de sistemas elétricos interligados, com horizonte de 24 horas, visando a validade técnica e replicabilidade industrial. O objetivo central é minimizar uma função que combina linearmente os custos de produção e de emissão de carbono, incorporando o efeito pontos-válvula para modelar as não linearidades das turbinas e uma penalidade baseada na literatura de \$50/tCO₂ para incentivar a descarbonização. Essa abordagem rigorosa garante que as simulações sejam rastreáveis e que as conclusões sobre o desempenho das soluções de inteligência artificial sejam robustas para aplicação em ambientes reais.

Para assegurar a viabilidade operativa, o modelo impõe restrições técnicas de balanço de potência ativa, limites de capacidade (mínima e máxima) das unidades térmicas e perdas na transmissão, calculadas de forma quadrática por meio da matriz de coeficientes B. A modelagem dos ativos captura comportamentos específicos: a geração eólica é representada probabilisticamente pela distribuição de Weibull, enquanto as inovadoras usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) operam de forma estratégica, atuando como carga em horários de baixa demanda e como geradores nos períodos de pico, maximizando a flexibilidade do sistema.

A resolução deste complexo problema de otimização é realizada por quatro arquiteturas de *deep learning*: DFF, LSTM, GRU e a inovadora Kolmogorov-Arnold Network (KAN). Embora normas industriais como ASTM ou ISO não se apliquem diretamente a simulações computacionais, a metodologia segue as melhores práticas de rigor científico, transparência e rastreabilidade para a validação e comparação dos modelos. O uso dessas ferramentas busca consolidar indicadores de desempenho concretos que permitam o planejamento operacional eficaz de redes elétricas modernas.

Resultados & Discussão

Esta seção detalha a aplicação de modelos de *Deep Learning* para a otimização de um sistema-teste de 10 geradores, simulando uma rede elétrica real. A análise foca no Cenário 02, que equilibra a minimização de custos

(60%) e a redução de emissões (40%), validando a integração de energia eólica com usinas hidrelétricas reversíveis (UHR). Essa configuração estratégica permitiu uma economia operacional média de US\$ 97.165,03 por dia e uma redução de 777,32 tCO₂ por dia, demonstrando o papel fundamental das UHRs em prover flexibilidade ao sistema, atuando como carga em períodos de baixa demanda e como geradoras nos horários de pico.

Em termos de desempenho computacional e confiabilidade, o estudo estabeleceu resultados convincentes quando comparado com a literatura e uma hierarquia clara entre as quatro arquiteturas testadas: DFF, GRU, LSTM e KAN. O modelo DFF apresentou o menor custo total e tempo de execução competitivo, enquanto o GRU, apesar de ser o mais rápido (4,6 vezes superior ao LSTM), mostrou-se pouco confiável por violar restrições de potência em mais de 600 MW. Já o LSTM destacou-se na redução de emissões, mas sua lentidão computacional prejudica o uso em tempo real, ao passo que a rede KAN, embora apresente custos mais elevados, oferece uma interpretabilidade superior, essencial para processos de auditoria e transparência no setor elétrico.

Contudo, ressalta-se que esses resultados foram obtidos em ambiente simulado de laboratório, correspondendo ao TRL 3-4, ainda sem validação em sistemas reais de grande porte. Para que a tecnologia seja aplicada em sistemas de grande escala e em tempo real, é necessária uma validação adicional com dados operacionais históricos e uma infraestrutura computacional mais robusta. Em suma, a pesquisa confirma que o uso de inteligência artificial aliado a sistemas de armazenamento é uma rota viável e eficaz para a descarbonização e o planejamento econômico de sistemas híbridos modernos.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Este trabalho conclui que as arquiteturas de *deep learning* analisadas, com destaque para a aplicação inédita das redes KAN, são ferramentas altamente eficazes para resolver a complexidade da coordenação hidrotérmica integrada a fontes renováveis e UHR, oferecendo a transparência e auditabilidade necessárias para mercados regulados. Atualmente, a tecnologia possui um nível de maturidade TRL 3-4, com prova de conceito validada analiticamente em ambiente de laboratório. Do ponto de vista de EHS, a solução é segura por ser baseada em software e gera impacto ambiental positivo ao viabilizar a redução da pegada de carbono no setor elétrico. Por fim, a metodologia demonstra viabilidade técnica e operacional de escalabilidade, sendo replicável para sistemas reais de grande porte através da futura integração com sistemas SCADA/EMS e do fortalecimento da infraestrutura computacional.

Próximos Passos (6–12 meses)

No horizonte de 6 a 12 meses, o projeto visa elevar a maturidade tecnológica de TRL 4 para níveis superiores, transicionando de simulações laboratoriais para validações em condições operacionais reais, bem como aperfeiçoamento das redes KAN. O plano de ação contempla a aplicação da metodologia em sistemas elétricos de maior porte para avaliar a robustez e a escalabilidade dos algoritmos, além da calibração dos modelos com dados históricos reais de demanda e geração eólica obtidos via parcerias institucionais. O desenvolvimento focará na criação de um protótipo funcional baseado na rede KAN, visando uma interface interpretável para equipes de operação. Como resultados finais deste período, será entregues um relatório técnico de validação.

Referências Essenciais

MING, Q.; DING, T.; SUN, Y.; MU, C.; PAN, K.; SHAHIDEHPOUR, M. Convex Hull Model for a Single Unit-Commitment Problem With Pumped Hydro Storage Unit. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 38, n. 5, 2023.

SAKTHIVEL, V.; THIRUMAL, K.; SATHYA, P. Short term scheduling of hydrothermal power systems with photovoltaic and pumped storage plants using quasi-oppositional turbulent water flow optimization. *Renewable Energy*, [S.l.], v. 191, p. 459-492, 2022.b

LIU, Z. et al. KAN: Kolmogorov-Arnold Networks. *arXiv:2404.19756 [cs.LG]*, 2024.

IV WORKSHOP DO PRH-54

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

**INTEGRAÇÃO DE REDES NEURAIS PROFUNDAS E ICA NO MAPEAMENTO DE
SEDIMENTOS DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA**

Fabrício S. Lima*; Allan K. D. Barros Filho

*fabricao.saul@discente.ufma.br

Resumo Executivo

A Margem Equatorial Brasileira (MEB) constitui fronteira exploratória estratégica, compreendendo as bacias Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar. A região abriga ecossistemas sensíveis — bioconstruções mesofóticas, *hardgrounds* e rodolitos — cuja caracterização é necessária para licenciamento exploratório e proteção ambiental. O mapeamento atual apresenta lacunas críticas: dados *in situ* dispersos, levantamentos geofísicos de alto custo e cobertura limitada, e mapas desatualizados que condicionam decisões equivocadas. Este trabalho propõe metodologia integrada baseada em Análise de Componentes Independentes (ICA) e redes neurais híbridas (CNN-LSTM) para classificação automatizada de sedimentos marinhos a partir de imagens *Sentinel-2*. O projeto encontra-se em desenvolvimento, com banco de imagens pré-tratadas disponível e classificadores preliminares (CNN e *Random Forest*) implementados, em fase de análise. A abordagem visa ampliar a cobertura espacial, reduzir latência na geração de mapas e produzir camadas temáticas para planejamento de infraestrutura submarina.

Palavras-chave: mapeamento sedimentológico; deep learning; sensoriamento remoto; margem equatorial brasileira; análise de componentes independentes

Metodologia & Normas Técnicas

A metodologia proposta estrutura-se em cinco módulos integrados conforme pipeline operacional. O módulo de aquisição compreende séries temporais de imagens *Sentinel-2* níveis L1C e L2A obtidas via *Copernicus Data Space Ecosystem*, priorizando cenas com cobertura de nuvens inferior a 20%. O sensor MSI provê 13 bandas espectrais com resoluções de 10, 20 e 60 metros, largura de faixa de 290 km e revisita combinada de cinco dias. Dados sedimentológicos de referência foram compilados e validados para uso como base de treinamento supervisionado dos modelos. O pré-processamento emprega algoritmo *FastICA* para pilhas temporais multiespectrais, fundamentado na maximização da não-gaussianidade para identificação de componentes estatisticamente independentes, combinado com máscaras de nuvem *s2cloudless* e *CloudS2Mask*. A arquitetura de classificação integra módulo convolucional (*backbone* ResNet50 ou EfficientNet) adaptado para 13 bandas espectrais, módulo LSTM bidirecional para captura de dependências temporais e mecanismo de atenção espacial e de canal. A augmentação de dados emprega redes generativas WGAN-GP com validação espectral via SAM e RMSE entre bandas. A validação segue partição espacial com k-fold estratificado por bacia sedimentar, utilizando métricas de acurácia, precisão, recall, F1-score, IoU e coeficiente kappa.

Figura 1 – Fluxograma de integração de redes neurais e ICA

Fonte: Elaboração própria (2026).

Resultados & Discussão

O projeto encontra-se nas etapas de aquisição de dados e desenvolvimento do módulo ICA. O banco de imagens Sentinel-2 pré-tratadas para a região da MEB está disponível, contemplando correção atmosférica e mascaramento de nuvens. Foram implementados dois classificadores preliminares — Rede Neural Convolutacional e *Random Forest* — cujos resultados encontram-se em análise quantitativa para estabelecimento de *baselines*. A literatura indica que arquiteturas CNN-LSTM alcançam acurácias de 85–95% em datasets de referência, enquanto modelos U-Net reportam IoU entre 0,70 e 0,90 em ambientes costeiros. Estudos com ICA demonstram separação de componentes ruidosos em até 40% dos pixels.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

O projeto situa-se atualmente em TRL 3, o que caracteriza uma prova de conceito com dados reais fundamentada na disponibilidade do banco de imagens e na implementação de classificadores preliminares utilizados como *baseline* de desempenho. Com a transição para TRL 4 prevista para o próximo semestre, o trabalho destaca-se pelo baixo impacto em termos de *Environment, Health and Safety* (EHS), visto que se baseia estritamente em processamento computacional, escalabilidade, proporcionada pelo uso de dados Sentinel-2 globais gratuitos e uma arquitetura replicável em nuvem com produtos interoperáveis em padrões COG, STAC e serviços OGC.

Próximos Passos

Os próximos passos da pesquisa contemplam a análise quantitativa dos *baselines* desenvolvidos, seguida pela implementação do módulo FastICA e pelo desenvolvimento da arquitetura híbrida CNN-LSTM otimizada via inferência bayesiana. Para assegurar a robustez estatística, será aplicada a técnica de validação k-fold espacial, culminando na geração de entregáveis estratégicos, tais como um *dataset* rotulado com metadados em conformidade com o padrão ISO 19115, além do código-fonte, relatórios técnicos e a submissão de artigos científicos.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Recursos Humanos da ANP (PRH 54.1) e a UFMA pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para desenvolvimento deste projeto. Aos professores Dr. Allan Kardec Duailibe Barros Filho e Dr. Dennys Correia da Silva pela orientação e mentoria, respectivamente. Também, deixo meus agradecimentos a M.e. Antônio Leitão Filho e a Aia Context pelas horas de debate e infraestrutura computacional disponibilizada.

Referências

FIGUEIREDO JR., A. G. et al. Síntese do conhecimento da geologia e geomorfologia da MEB. Piatam Oceano, 2008.

MOURA, R. L. et al. An extensive reef system at the Amazon River mouth. *Science Advances*, v. 2, e1501252, 2016.

CICHOCKI, A. et al. Robust techniques for ICA with noisy data. *Neurocomputing*, v. 22, p. 113-129, 1998.

THARWAT, A. Independent component analysis: an introduction. *Applied Computing and Informatics*, v. 17, p. 222-249, 2021.

GULAPALA, H. P.; PADMAVATHI, K. Deep hybrid CNN-LSTM model for LULC classification. *Annals of Data Science*, 2025.

SATELLITE IMAGE DEEP LEARNING. Techniques for deep learning with satellite imagery. GitHub, 2026.

IV WORKSHOP DO PRH-54 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Modelagem Não-Linear e Controle Ótimo MIMO de Plataformas Semissubmersíveis: Uma Abordagem Híbrida via HDP, AD-HDP e MPC

*Witallo W. N. Silva*1#; João V. da Fonseca Neto2#;*

**e-mail: witallo.silva@discente.ufma.br*

Resumo Executivo

A instabilidade dinâmica de plataformas semissubmersíveis compromete a eficiência operacional, eleva o consumo energético dos sistemas de lastro e posicionamento e aumenta o risco de paradas não programadas em operações offshore de águas profundas. Avalia-se uma estratégia híbrida de controle MIMO para sistemas com seis graus de liberdade, combinando controle ótimo baseado em Programação Dinâmica Aproximada (HDP/AD-HDP) e Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC), aplicada em um ambiente de simulação não linear de alta fidelidade representativa de condições operacionais offshore reais. A proposta integra um MPC multivariável cuja função custo é ajustada online por um agente ator-crítico, reduzindo significativamente a necessidade de sintonia manual e permitindo adaptação contínua às perturbações ambientais. Resultados preliminares indicam redução de até 30% nas oscilações de roll e pitch e economia aproximada de 18% no esforço de controle, evidenciando potencial para aumento da estabilidade global e redução do OPEX. A arquitetura proposta apresenta elevada aplicabilidade industrial e possibilidade de escalonamento para sistemas reais de controle embarcado.

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

A metodologia adotada baseia-se na modelagem dinâmica não linear completa de uma plataforma semissubmersível com seis graus de liberdade (surge, sway, heave, roll, pitch e yaw), incluindo efeitos de massa adicionada, amortecimento hidrodinâmico dependente da velocidade, forças restauradoras e acoplamento multivariável entre os movimentos. O modelo foi implementado em ambiente MATLAB/Simulink para simulação dinâmica e validação de estratégias de controle, utilizando formulação vetorial de segunda ordem no domínio do tempo, calibrada a partir de parâmetros físicos reportados na literatura para plataformas do tipo OC4. Desenvolveu-se um controlador ótimo do tipo LQR, obtido a partir da linearização local do modelo não linear em torno do ponto de equilíbrio operacional nominal, com matrizes de ponderação definidas por critérios energéticos. Na etapa seguinte, foi projetado um Controlador Preditivo Baseado em Modelo (MPC) multivariável, considerando horizonte de predição de 20 passos, horizonte de controle de 5 passos e restrições explícitas de saturação e taxa de variação nos sinais de atuação dos sistemas de lastro. A função custo inclui termos quadráticos associados ao erro de estado e ao esforço de controle. Por fim, foi incorporado um agente inteligente do tipo Ator-Crítico, nas arquiteturas HDP e AD-HDP, responsável pela atualização online das matrizes de ponderação do MPC, caracterizando uma abordagem híbrida MPC-AD-HDP. As redes neurais dos módulos ator e crítico foram treinadas online para adaptação dinâmica das matrizes de ponderação do controlador MPC por retropropagação temporal, utilizando dados do próprio sistema, sem etapa de treinamento offline. A avaliação de desempenho considerou métricas típicas de engenharia offshore, incluindo amplitude máxima de roll e pitch, tempo de acomodação, erro quadrático médio (RMSE) e energia integrada de atuação. Embora o estudo esteja centrado em simulação, o desenvolvimento segue diretrizes de qualidade e rastreabilidade compatíveis com normas utilizadas em sistemas de controle e estruturas offshore.

Resultados & Discussão

Os resultados obtidos demonstram diferenças significativas de desempenho entre as estratégias avaliadas. O controlador PID apresentou capacidade limitada de amortecimento das oscilações, com amplitudes máximas de roll superiores a 6,2° e tempos de acomodação acima de 120 s sob perturbações ambientais moderadas, além de elevada

variabilidade no esforço de controle. O regulador LQR proporcionou melhoria na resposta transitória, reduzindo o pico de roll para aproximadamente $4,5^\circ$, porém mostrou sensibilidade à escolha das matrizes de ponderação, exigindo sintonia manual frequente diante de variações nas condições de operação. A implementação do MPC multivariável resultou em redução adicional das oscilações, com diminuição no RMSE de pitch em relação ao LQR e melhor gerenciamento das restrições dos atuadores de lastro. Entretanto, observou-se degradação gradual de desempenho quando o sistema operava fora do ponto nominal de linearização. A arquitetura híbrida MPC–AD–HDP apresentou o melhor desempenho global. A sintonia adaptativa online permitiu reduzir em até 35% as amplitudes máximas de roll e pitch quando comparada ao MPC convencional, além de economia aproximada de 18% na energia acumulada dos atuadores ao longo do horizonte de simulação. Esses ganhos estão associados à capacidade do agente ator-crítico em ajustar dinamicamente os pesos da função custo, priorizando estabilidade angular durante eventos transitórios e minimizando esforço de controle em regime permanente.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

O estudo demonstra que a combinação de MPC com Programação Dinâmica Aproximada constitui uma abordagem promissora para o controle ótimo adaptativo de plataformas semissubmersíveis, superando estratégias clássicas em termos de estabilidade, eficiência energética e robustez operacional. A arquitetura híbrida proposta elimina a necessidade de sintonia manual recorrente e permite adaptação contínua a condições ambientais variáveis, característica altamente relevante para aplicações offshore.

A tecnologia encontra-se em TRL 4–5, correspondente à validação em ambiente de simulação de alta fidelidade. Do ponto de vista de EHS, a solução não introduz riscos físicos ou químicos adicionais, podendo contribuir para a redução de esforços mecânicos e demanda energética dos sistemas de lastro e para o aumento da integridade estrutural da plataforma. O potencial de escalabilidade é elevado, uma vez que o controlador pode ser integrado a arquiteturas existentes de Dynamic Positioning ou sistemas de gerenciamento de lastro, demandando apenas adequações em software e instrumentação. A abordagem é compatível com implementação embarcada em controladores industriais ou sistemas supervisórios, favorecendo futura aplicação em unidades piloto offshore.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos 6–12 meses, o projeto avançará para a consolidação da arquitetura híbrida MPC–AD–HDP e sua validação em ambientes mais próximos da realidade operacional. Inicialmente, será ampliado o conjunto de cenários ambientais simulados, incluindo diferentes estados de mar e perfis de corrente, com meta de manter redução mínima de 30% nas oscilações angulares em relação ao MPC convencional. Em seguida, pretende-se implementar um protótipo do controlador em ambiente Hardware-in-the-Loop para validação em tempo real e avaliação de viabilidade de implementação embarcada, integrando o algoritmo a um controlador industrial e avaliando latência, estabilidade numérica e requisitos computacionais. Paralelamente, serão realizados estudos de sensibilidade paramétrica e análise de robustez. Como entregáveis, estão previstos um modelo consolidado da plataforma, um protótipo funcional do controlador híbrido, curvas comparativas de desempenho PID/LQR/MPC/AD–HDP.

Referências Essenciais

- AALIPOUR, A.; KHANI, A. Data-driven H-infinity control with a real-time and efficient algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023.
- CERQUEIRA, M.; LOPES, L.; FONSECA NETO, J. V. Sintonia QR do regulador linear quadrático LQR discreto e programação dinâmica aproximada baseada em ação-estado. *Trends in Computational and Applied Mathematics*, v. 25, n. 1, 2024.
- MARWEDEL, P. *Embedded system design*. 4. ed. Cham: Springer, 2021.
- ROMERO, A.; SONG, Y.; SCARAMUZZA, D. Actor-critic model predictive control. In: *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA)*, 2024. Anais... 2024.

IV WORKSHOP DO PRH-54 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Redes Neurais Discretas Aplicadas à Análise Sedimentar da Margem Equatorial Brasileira.

*Lucas Fontenele Ramos*1#, Allan Kardec Duailibe Barros Filho2#*

*[*Lucas.fontenele@discente.ufma.br](mailto:Lucas.fontenele@discente.ufma.br)*

Resumo Executivo

A caracterização sedimentar offshore na Margem Equatorial Brasileira é um desafio técnico para a indústria de petróleo e gás, pois incertezas geológicas e biológicas afetam o risco exploratório, os custos e o planejamento sísmico e de perfuração. Métodos convencionais, baseados em interpretação manual de dados sísmicos e informações pontuais de poços, têm limitações de resolução, alto custo e forte dependência de especialistas.

Este trabalho avalia o uso de redes neurais artificiais para classificação e mapeamento sedimentar automatizados, integrando imagens de satélite, dados sísmicos, biológicos e geológicos. A metodologia inclui pré-processamento por Análise de Componentes Independentes (ICA) para reduzir ruídos e variáveis irrelevantes. Resultados preliminares indicam potencial para maior consistência na classificação e redução de incertezas na fase pré-exploratória, apoiando estudos de perspectiva e a tomada de decisão industrial.

Palavras-chave: Análise sedimentar; redes neurais artificiais, margem equatorial brasileira, imagens de satélite, análise de componentes independentes (ICA).

Relevância industrial

Na fase pré-exploratória, a indústria de petróleo e gás enfrenta altos custos na aquisição e interpretação de dados sísmicos, levantamentos geológicos e tomada de decisão sob incerteza. A metodologia proposta tem relevância industrial ao reduzir gastos e otimizar recursos nessa etapa crítica.

O uso de redes neurais discretas para classificação sedimentar automatizada aumenta a eficiência na análise integrada de grandes volumes de dados, diminuindo a dependência de interpretações manuais e retrabalhos. Ao apoiar a identificação de lâminas sedimentares e a delimitação de áreas com maior potencial, a abordagem pode reduzir campanhas adicionais de aquisição de dados, otimizar o planejamento exploratório, mitigar riscos na locação de poços e subsidiar a escolha de materiais e estratégias de perfuração conforme as características do substrato esperado.

Espera-se, assim, contribuir para a otimização de custos e para um melhor direcionamento de investimentos nas fases iniciais da exploração offshore.

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

A metodologia baseia-se na integração de dados aplicados à exploração offshore, incluindo imagens ópticas do Sentinel-2, atributos sísmicos de bases institucionais e informações geológicas de relatórios técnicos e bancos públicos. Os dados passam por pré-processamento (correção geométrica, normalização radiométrica e filtragem estatística) para reduzir ruídos e inconsistências. A Análise de Componentes Independentes (ICA) é utilizada para maximizar a independência estatística e aprimorar a discriminação de padrões sedimentares.

As redes neurais discretas são treinadas de forma supervisionada, com classes definidas a partir de dados de referência, e validadas por subconjuntos independentes, utilizando métricas de acurácia global e matrizes de confusão.

No caso das imagens públicas do Sentinel-2, o imageamento multiespectral da Margem Equatorial Brasileira ocorre por meio de bandas ópticas, a partir da interação da radiação solar com a coluna d'água, permitindo análises baseadas em variações espectrais associadas às diferentes profundidades, conforme proposto no estudo.



Imagem 01 – Delimitação da Margem Equatorial Brasileira – Sentinel – 2

Resultados & Discussão

Resultados preliminares indicam que o uso de redes neurais discretas com pré-processamento por ICA aumenta a consistência espacial da classificação sedimentar em relação a abordagens convencionais, reduzindo ambiguidades entre classes litológicas adjacentes, sobretudo em áreas de alta heterogeneidade deposicional. A comparação com dados geológicos de referência aponta maior robustez na identificação de sedimentos arenosos e lamíticos, essenciais para a avaliação reservatório-selo. Operacionalmente, a metodologia pode reduzir incertezas exploratórias, apoiar análises de risco e otimizar recursos em campanhas sísmicas e de perfuração.

Conforme ilustrado na imagem 01, áreas próximas às fozes de rios apresentam maior turbidez, indicando predominância de lamitos e cascalhos e menor probabilidade de ecossistemas coralíneos ativos — hipótese ainda dependente de validação biológica específica, já que substratos arenosos e lamíticos são pouco favoráveis à sua ocorrência. O enfoque ambiental, especialmente sobre ecossistemas de corais, permanece como linha de investigação. A principal limitação atual é a disponibilidade de dados rotulados, etapa prevista na continuidade da análise sedimentar da Margem Equatorial Brasileira.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Serão consideradas as métricas de acurácia e F1-score para apoiar a caracterização sedimentar em ambientes offshore complexos, aumentando a confiabilidade da interpretação geológica na exploração de petróleo e gás. A solução está em TRL 3–4, com validação conceitual em ambiente simulado, e pode evoluir para TRL 5–6 com integração de dados das bacias da Margem Equatorial e testes operacionais. Do ponto de vista de EHS, não há riscos adicionais, pois a abordagem baseia-se apenas em processamento digital. A escalabilidade é alta, permitindo aplicação em outras bacias com ajustes de parametrização e ampliação das bases de treinamento.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos passos, o projeto aprofundará as análises integradas de dados geológicos, geofísicos e ambientais, consolidando a base utilizada no treinamento supervisionado das redes neurais. Serão incorporados e avaliados dados biológicos e ambientais secundários para verificar a possível presença de ecossistemas marinhos ativos, hipótese atualmente baseada apenas em dados remotos e ainda sem validação in situ. O modelo de rede neural seguirá em aprimoramento, com novos ciclos de treinamento e ajuste de parâmetros, visando maior eficiência computacional e acurácia estatisticamente significativa. Espera-se que esses refinamentos resultem em classificações mais robustas e confiáveis, contribuindo para resultados positivos nos estudos aplicados à Margem Equatorial Brasileira e para o fortalecimento da metodologia como ferramenta de apoio à tomada de decisão na fase pré-exploratória.

Referências Essenciais (ABNT ou Vancouver – manter padrão consistente)

- SILVA, J. R.; SANTOS, M. A. Geologia da Margem Equatorial Brasileira. São Paulo: Editora Geociências, 2018. COSTA, L. F.; ALMEIDA, P. R. Redes neurais aplicadas à geologia. Rio de Janeiro: Editora Ciência e Tecnologia, 2020.
- OLIVEIRA-PINTO, S.; ROSA-SANTOS, P.; TAVEIRA-PINTO, F. Assessment of the potential of combining wave and solar energy resources to power supply worldwide offshore oil and gas platforms. *Energy Conversion and Management*, v. 223, p. 113299, 2020.
- SHI, G. et al. Grid integration of offshore wind farms and offshore oil/gas platforms. In: *PROCEEDINGS OF THE 7TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE*. IEEE, 2012. p. 1301–1305.
- LYDIA, M.; KUMAR, G. E. P. Machine learning applications in wind turbine generating systems. *Materials Today: Proceedings*, v. 45, p. 6411–6414, 2021.

IV WORKSHOP DO PRH-54

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Sistemas de Aquisição, Tratamento e Construção de Conjunto de Dados para Detecção e Estimativa de Eventos em Sistemas Complexos

Sthefferson Bruno Costa Ferreira#1; José Eduardo Onoda Pessanha#2*

**sthefferson.ufma@gmail.com*

Resumo Executivo (100–150 palavras)

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema digital para aquisição, tratamento e construção de conjuntos de dados visando à detecção e à estimativa probabilística de eventos raros e potencialmente devastadores, com base na Teoria de Valores Extremos e na estimação Bayesiana dos parâmetros da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), a partir de medições de campo e registros operacionais heterogêneos. A solução integra rotinas de pré-processamento, sincronização temporal, tratamento de dados faltantes e engenharia de características, gerando datasets rastreáveis e adequados às análises probabilísticas. Como aplicação prática inicial, o sistema é implementado e avaliado em sistemas elétricos de potência (SEPs), utilizando dados de Unidades de Medição Fasorial (PMUs). Estudos preliminares e benchmarking comparativo com pipelines convencionais, sem pré-processamento estruturado e sem modelagem estatística de cauda, indicam potencial de reduzir em 15–25% a incidência de falsos alarmes, melhorar em até 20% a qualidade estatística dos dados e apoiar reduções estimadas de 5–10% no OPEX associado a intervenções corretivas. A arquitetura escalável permite aplicação futura em diferentes setores industriais.

Palavras-chave: aquisição de dados; engenharia de dados; eventos severos; sistemas complexos; sistemas elétricos

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

A metodologia consiste no desenvolvimento de um sistema digital integrado para aquisição, tratamento e construção de conjuntos de dados a partir de medições operacionais em sistemas complexos, com foco em rastreabilidade, consistência temporal e aplicabilidade industrial. A proposta é estruturada em aquisição, ingestão, pré-processamento, engenharia de características e validação em SEPs com comunicação padrão IEEE C37.118, assegurando integridade dos pacotes e sincronização temporal (ZHAO et al., 2015). A ingestão dos dados segue a arquitetura de mensageria distribuída (KREPS et al., 2011), o pré-processamento contempla rotinas de limpeza de dados, detecção e mitigação de valores atípicos (IEC 61000-4-30), incluindo práticas compatíveis com normas técnicas nacionais (ABNT). Na engenharia de características, os sinais brutos são transformados em variáveis mais informativas aumentando a densidade informacional dos conjuntos de dados (datasets), cuja construção considera estratégias adaptáveis à baixa frequência dos eventos baseada em fundamentos de modelagem probabilística descritos na literatura (COLES, 2001), inferência Bayesiana e amostragem Monte Carlo Hamiltoniano (REIS; PESSANHA, 2022; REIS; PESSANHA, 2023). A validação envolve análises de consistência estatística, rastreabilidade das transformações aplicadas e avaliação de desempenho computacional do sistema, incluindo latência e capacidade de operação contínua, sendo a metodologia concebida de forma modular para permitir adaptação a outros sistemas industriais complexos, respeitando normas técnicas específicas, requisitos de segurança, confiabilidade operacional e governança de dados.

Resultados & Discussão

Os resultados iniciais definem a arquitetura do sistema digital e apresentam avaliação preliminar de seu potencial de aplicação industrial, estudos de requisitos, análises de arquitetura e simulações exploratórias, espera-se que as metodologias, métodos e técnicas adotadas melhorem a consistência e a qualidade informacional dos datasets. A literatura e testes preliminares indicam que pipelines estruturados de tratamento de dados apresentam potencial para reduzir significativamente inconsistências operacionais e alarmes espúrios, em comparação a abordagens sem tratamento dedicado, especialmente em cenários com múltiplas fontes de medição. Do ponto de vista operacional,

espera-se contribuir para maior confiabilidade analítica, robustez na tomada de decisão e redução de riscos de intervenções corretivas não planejadas. As principais limitações observadas até agora, que serão devidamente tratadas ao longo do projeto, são a ausência de validação com dados contínuos de campo e períodos de medição mais longos.

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Investigações preliminares destacam o potencial da proposta para qualificar dados operacionais reduzindo inconsistências, desalinhamento temporal e baixa rastreabilidade, colocando em risco análises de confiabilidade e tomada de decisão em sistemas industriais complexos. Mesmo sem resultados consolidados, as análises de arquitetura, simulações iniciais e benchmarking da literatura apontam que a aplicação sistemática de rotinas de aquisição, tratamento e engenharia de características tendem a melhorar a qualidade informacional dos datasets, provendo diagnósticos mais confiáveis e robustos. O projeto encontra-se atualmente em validação conceitual e desenvolvimento inicial, correspondendo ao nível TRL 3–4 (validação analítica e experimental em ambiente controlado), com modelagem, simulações e implementação em ambiente controlado, e avanço previsto para testes e validação com dados reais em ambiente industrial. A proposta não introduz riscos físico-químicos ou ambientais; contudo, requer atenção a aspectos de segurança elétrica, integridade da instrumentação, confiabilidade e redundância da comunicação, integridade dos dados e cibersegurança na integração com sistemas industriais reais, em conformidade com as normas técnicas aplicáveis. Em termos de escalabilidade, a arquitetura modular e desacoplada do sistema favorece a expansão (*scale-up*) para diferentes unidades e ambientes industriais, sendo necessários, nas próximas etapas, estudos adicionais de desempenho, padronização de interfaces, integração com sistemas supervisórios e validação operacional para permitir sua replicação segura em ambientes industriais reais.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos 6–12 meses, o projeto irá implementar e consolidar o sistema digital de aquisição e tratamento de dados, utilizando exclusivamente bases provenientes do MEDPLOT (PMUs), dados fasoriais sincronizados com resolução temporal típica de 30–120 amostras por segundo. Espera-se concluir a integração do pipeline de ingestão e armazenamento, seguida da implementação e validação das rotinas de pré-processamento, incluindo sincronização temporal, tratamento de dados faltantes, filtragem de inconsistências e engenharia de características. Na sequência, serão realizados ajustes nos parâmetros de tratamento e nas estratégias de construção dos datasets, visando adequação a análises de detecção e estimativa de probabilidade. Como produto final, será desenvolvido um protótipo funcional do sistema digital, documentação técnica da arquitetura e relatórios de validação dos conjuntos de dados gerados, preparando a evolução do projeto para testes em ambientes industriais e avanços nos níveis de maturidade tecnológica.

Referências Essenciais (ABNT ou Vancouver – manter padrão consistente)

- COLES, S. *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer, 2001.
- KREPS, J.; NARKHEDE, N.; RAO, J. Kafka: a distributed messaging system for log processing. In: *Proceedings of the NetDB*. Athens, Greece, 2011.
- REIS, D. J. F.; PESSANHA, J. E. O. Implementing the Hamiltonian Monte Carlo sampling algorithm in stochastic assessment of power systems. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 33, p. 522–530, 2022.
- REIS, D. J. F.; PESSANHA, J. E. O. A fast and accurate sampler built on Bayesian inference and optimized Hamiltonian Monte Carlo for voltage sag assessment in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 153, p. 109297, 2023.
- ZHAO, J. et al. Power system real-time monitoring by using PMU-based methods. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, p. 300–309, 2015.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Geneva, 2015.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std C37.118: IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems. New York, 2011.

IV WORKSHOP DO PRH-54
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE EXTRATOS VEGETAIS COMO BIOADITIVOS PARA A
INDÚSTRIA DE P&G**

Beatriz Barros Mesquita*; Caroline Barros Mesquita; Jaciene Jesus Freitas Cardoso

***bb.mesquita@discente.ufma.br**

Resumo Executivo

O controle da biocorrosão é um desafio crítico em indústrias de petróleo, onde as bactérias redutoras de sulfato (BRS) dentre outras como as bactérias produtoras de ácidos (BPA), impulsionadas pelo fraturamento hidráulico, são responsáveis por cerca de 40% da corrosão em tubulações e pelo entupimento de poços, o que pode afetar a adequação com a norma NACE 0000SP0775, que estipula o limite aceitável para corrosão em sistemas de aço-carbono em áreas de petróleo. O uso de biocidas sintéticos convencionais, embora eficiente, gera riscos ambientais devido à sua toxicidade e difícil degradação. Este projeto avalia o uso de extratos a partir de espécies vegetais como biocidas naturais, feitos em escala laboratorial. O extrato demonstrou alta capacidade antioxidante, com valores de IC₅₀ de 2,18 mg/L (DPPH) e 9,30 mg/L (ABTS), sendo classificado como muito ativo na inibição dos processos oxidativos. Essa solução é sustentável, pois utiliza a biodiversidade local para reduzir o OPEX e o impacto ambiental, apresentando potencial para substituição parcial ou total de aditivos sintéticos em fluidos de perfuração.

Palavras-chave: Biocorrosão; Petróleo e Gás; Biocidas Naturais; Fitoquímicos; Antioxidantes

Metodologia & Normas Técnicas

No presente estudo, foi avaliado o desempenho de extratos vegetais da espécie nativa do cerrado *Brosimum gaudichaudii* (mama-cadela) e *Echinodorus grandiflorus* (chapéu de couro) como bioaditivos para aplicação em fluidos de fraturamento hidráulico na indústria de petróleo e gás natural. O processamento das folhas e cascas de foram feitas submetendo-as à processos de lavagem, secagem e trituração utilizando como solvente o álcool etílico P.A. com tempo de exposição de 14 dias. Em termos qualitativos, realizou-se a análise fitoquímica baseada no protocolo de Matos (1997) que permite identificar moléculas com caráter antioxidante em espécimes vegetais. A identificação de grupos funcionais foi determinada por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR (modelo Shimadzu: IR-Prestige-21) na região de varredura de 400—4000 cm⁻¹, em análises de transmitância com pastilhas de KBr. A capacidade antioxidante foi determinada pelos métodos de sequestro de radicais livres DPPH e ABTS (Rufino *et al.*, 2007). As leituras de absorbância foram feitas em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 515 nm (DPPH) e 734 nm (ABTS). Foi testada a eficácia dos bioaditivos em retardar ou diminuir a taxa de corrosão e a vida útil de peças de aço 1045 em meio salino 3,5% (NaCl) empregando a técnica de polarização potenciodinâmica realizada no potenciostato o qual também foi feito a espectroscopia de impedância eletroquímica.

Resultados & Discussão

O processo de extração da Mama-cadela e chapéu de couro apresentou um rendimento de 8,3% e de 7,8% respectivamente. A eficiência do processo garantiu a obtenção de uma gama de moléculas resultantes dos metabólitos secundários dos vegetais, as quais foram qualificadas pelo teste fitoquímico. De modo geral, foi confirmada a presença de importantes compostos como fenóis, catequinas, taninos e flavonóis no extrato. Essas moléculas possuem múltiplos anéis aromáticos e grupos doadores de elétrons, o que lhes confere uma alta densidade eletrônica capaz de estabilizar radicais livres e inibir processos oxidativos. A presença desses compostos é um indicativo direto da

capacidade do extrato em atuar como um inibidor natural contra bactérias. A caracterização por Espectroscopia de Infravermelho (FT-IR) confirmou grupos funcionais presentes nas moléculas encontradas, registrando bandas intensas entre 3400 e 3300 cm^{-1} (vibração O-H de fenóis) e picos próximos a 1600 cm^{-1} (ligações C=C de anéis benzênicos). As deformações angulares na faixa de 900 a 650 cm^{-1} confirmaram a presença de sistemas aromáticos substituídos (Donald L. Pavia e George S. Kriz, 2008). Em relação à capacidade antioxidante, as curvas padrão obtidas pelos métodos DPPH e ABTS demonstraram que ambos os extratos reagem com radicais livres. A mamacadeira e o Chapéu-de-couro apresentaram um valor de IC50 com o DPPH de 2,18 mg/L, indicando que mesmo em uma concentração mais baixa, os extratos têm efeitos antioxidantes capazes de inibir em 50% as consequências da oxidação causados por radicais livres. Em termos de eficiência de processo, essa atividade sugere que o bioaditivo pode atuar preventivamente na formação de biofilmes no fundo do poço, reduzindo custos operacionais com manutenção (OPEX).

Conclusões, TRL & Escalabilidade

Os resultados experimentais indicam uma provável aplicação de extratos vegetais nativos do Maranhão para substituir biocidas sintéticos tóxicos na mitigação da biocorrosão causada por bactérias (Silva R. C. G., 2021). A solução resolve uma vulnerabilidade do setor de óleo e gás: a necessidade de aumentar a vida útil dos ativos. O projeto encontra-se em TRL 2-3, com aplicações práticas que apontam para a confirmação da ideia inicial e com validação da integração dos componentes em escala de bancada e a metodologia de extração e caracterização laboratorial em fase de execução. Sob a perspectiva de EHS, o estudo não tem dependência de reagentes tóxicos, sendo os principais insumos as espécies vegetais e o álcool etílico, que é menos agressivo que o metanol ou hexano. É feita a recuperação do solvente por rotaevaporação, diminuindo o OPEX e a contaminação ambiental. Dessa forma, o projeto promove uma melhoria significativa nos riscos de operação, pois tende a reduzir ou ainda substituir os aditivos químicos sintéticos de alta toxicidade por um aditivo de base natural e renovável. O projeto apresenta elevado potencial de escalonamento industrial, pois os processos de obtenção dos extratos envolvem operações unitárias facilmente replicáveis em proporções maiores. Para a dimensão industrial, serão necessários estudos complementares de estabilidade térmica em condições reais de reservatório e a análise logística de suprimento e armazenamento das matérias-primas regionais, visando respeitar o período de sazonalidade de cada espécie vegetal, conforme Instrução Normativa (IN) MMA nº 03, do Ministério do Meio Ambiente.

Próximos Passos

Consolidar a eficácia dos extratos frente a microrganismos causadores da biocorrosão é a prioridade do cronograma. Será realizada uma avaliação do potencial da atividade antibactericida das amostras. Após isso, os extratos serão analisados quanto sua atividade antibacteriana para bactérias específicas como as que são redutoras de sulfato. Os ensaios ocorrerão conforme metodologias adaptadas de Fonseca (2018), utilizando cepas das famílias *Desulfobacter* e/ou *Desulfosporosinus* e acontecerão validações em diferentes concentrações. Serão realizadas as análises de corrosão restantes com ensaios eletroquímicos, incluindo o monitoramento do de Potencial de Circuito Aberto (OCP), objetivando a adequação aos limites da taxa de corrosão estipuladas pela norma NACE SP0775. Após essas etapas, pretende-se realizar testes de compatibilidade em fluidos de perfuração para verificar se os extratos vegetais alteram as propriedades do fluido como viscosidade e densidade, por exemplo. Ao final, espera-se entregar um relatório técnico consolidado com as curvas de desempenho biocida e uma nota técnica avaliando a viabilidade de substituição dos aditivos sintéticos atuais para redução de impacto ambiental.

Referências

- DONALD L. Pavia; GEORGE, S; KRIS, B. Introduction to spectroscopy. Ed. 4. 2008.
- FONSECA, R. S. Avaliação de biocidas naturais no controle da biocorrosão em aço carbono 1020.
- MATOS, F. J. A. Introdução à fitoquímica experimental. Fortaleza, 1997.
- RUFINO, M. Determinação da atividade antioxidante em frutas com o DPPH. Embrapa, p. 4. Fortaleza. 2007.
- SILVA, R. C. G. Avaliação do extrato como inibidor de corrosão para o aço carbono 1020. Rio de Janeiro, 2021.

IV WORKSHOP DO PRH-54 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

ESPONJAS SUPERHIDROFÓBICAS FABRICADAS A PARTIR DE SiO_2 /FIBRAS DE PET PARA SEPARAÇÃO ÓLEO/ÁGUA EM EFLUENTES DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS

Anna Paula S. da Silva; Najla Y.R.C. Santos#2; Leonardo T. B. Mendonça#3;

**anna.pss@discente.ufma.br*

Resumo Executivo

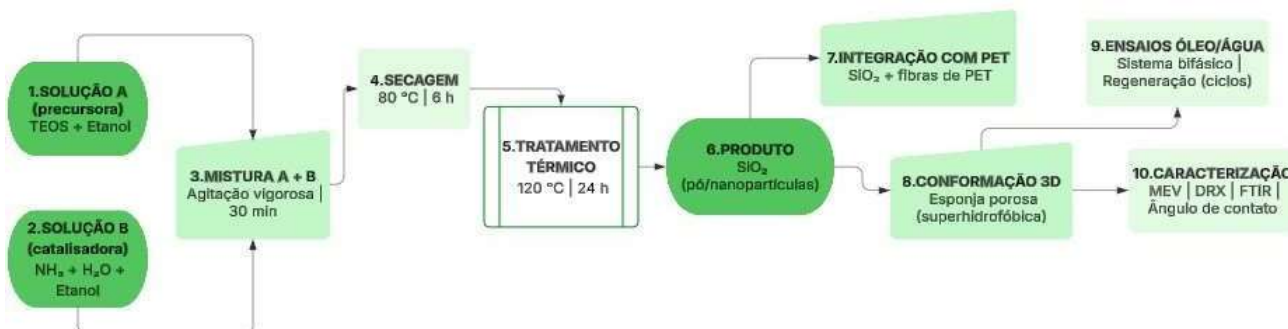
Efluentes oleosos gerados em refinarias, terminais e estações de tratamento elevam custos operacionais e aumentam o risco de não conformidade ambiental quando a separação óleo/água apresenta baixa eficiência e alta geração de resíduos. Este trabalho desenvolve esponjas superhidrofóbicas fabricadas a partir de SiO_2 /fibras de PET como sorventes seletivos para remoção e recuperação de hidrocarbonetos em sistemas bifásicos, com foco em reuso e viabilidade de escala. A etapa inicial contempla a síntese de SiO_2 por sol-gel, sua incorporação às fibras de PET e a conformação em estruturas porosas 3D. Posteriormente, são realizadas as etapas de caracterização (MEV, DRX, FTIR e ângulo de contato) e ensaios de desempenho baseados em protocolos consolidados na literatura técnica e alinhados a práticas de avaliação industrial. Como metas tecnológicas, espera-se capacidade de sorção $\geq 20 \text{ g g}^{-1}$, eficiência de separação óleo/água $\geq 95\%$ e estabilidade em ≥ 100 ciclos de reuso/regeneração, mantendo $\geq 80\%$ da capacidade de sorção inicial, preparando validação e escalabilidade nos próximos 6–12 meses.

Palavras-chave: Efluentes Oleosos; PET Reciclado; SiO_2 ; Sorventes Seletivos; Separação Óleo/Água.

Metodologia & Normas Técnicas (ASTM/ISO/ABNT)

A metodologia segue uma rota de desenvolvimento e validação em laboratório, com rastreabilidade de insumos, condições operacionais e critérios de desempenho para aplicação industrial em separação óleo/água. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo, descrevendo de forma sequencial as etapas desde a síntese sol-gel de SiO_2 (preparo das soluções, mistura, secagem e tratamento térmico) até a integração do SiO_2 com fibras de PET, conformação da esponja porosa 3D e aplicação em caracterizações e ensaios óleo/água.

Figura 1 – Fluxograma da síntese sol-gel de SiO_2 e integração com fibras de PET para produção das esponjas e ensaios de separação óleo/água.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Com base no fluxo descrito na Figura 1, o SiO₂ será obtido por rota sol–gel, seguido de secagem e tratamento térmico para obtenção do pó/nanopartículas, e então integrado às fibras de PET para conformação de uma estrutura porosa 3D (esponja), visando induzir rugosidade micro/nano e maximizar a hidrofilicidade e a seletividade ao óleo. A avaliação do material será conduzida em bancada, com posterior avanço para condições representativas e escalas superiores, incluindo caracterizações (MEV, DRX e FTIR), medidas de ângulo de contato e ensaios em sistemas bifásicos óleo/água (capacidade de sorção, eficiência de separação e estabilidade em ciclos de regeneração). Os resultados serão reportados como média $\pm$ desvio padrão (mínimo de triplicatas), com análise estatística quando pertinente, adotando normas técnicas aplicáveis (ASTM/ISO/ABNT) como referência, com adaptações justificadas quando necessário.

Resultados & Discussão

Os resultados são preliminares e baseiam-se em metas tecnológicas e dados de literatura para materiais superhidrofóbicos aplicados à separação óleo/água. O foco é indicar como a rota SiO₂/fibras de PET pode elevar a seletividade e a eficiência de remoção de hidrocarbonetos em sistemas bifásicos.

A avaliação será conduzida por capacidade de sorção (g/g), eficiência de separação (%) e estabilidade em ciclos de regeneração, com metas de ≥ 20 g/g, $\geq 95\%$ e ≥ 100 ciclos com retenção $\geq 80\%$ da capacidade inicial. A interpretação correlacionará desempenho com hidrofobicidade (ângulo de contato), rugosidade/morfologia e estrutura porosa 3D, suportada por MEV, DRX, FTIR, BET e TGA, além da comparação entre rotas de fabricação das fibras (melt spinning e alternativa de maior produtividade) sob as mesmas métricas (capacidade, eficiência, fluxo e reuso).

Conclusões, TRL & Escalabilidade

As análises discutidas nesta seção refletem o estágio preliminar do projeto e estão fundamentadas em metas tecnológicas, conclui-se que a proposta tem coerência técnica e aderência industrial para separação óleo/água, ao combinar uma matriz porosa de fibras de PET com SiO₂ para aumento de rugosidade e hidrofobicidade, buscando seletividade à fase oleosa e reuso do material. O principal mérito industrial do projeto, nesta etapa, é apresentar indicadores de desempenho objetivos para tomada de decisão (capacidade de sorção, eficiência de separação e durabilidade em reuso), com metas quantitativas que permitem comparação direta com alternativas de referência e definição clara de “go/no-go”. Como maturidade tecnológica, o projeto se enquadra em TRL 2–3, pois ainda está em fase de consolidação e validação laboratorial do conceito e do desempenho do compósito. Quanto à escalabilidade, o potencial é favorecido pelo uso de PET reciclado e por rotas de fabricação compatíveis com processamento termoplástico, desde que sejam asseguradas reprodutibilidade entre lotes e estabilidade de desempenho no reuso, que são os fatores críticos para avançar a tecnologia para níveis superiores.

Próximos Passos (6–12 meses)

Nos próximos 6–12 meses, o projeto irá padronizar a síntese de SiO₂ e sua integração às fibras de PET, assegurando reprodutibilidade entre lotes. Em seguida, serão produzidas e comparadas esponjas por rotas de fabricação de fibras (incluindo melt spinning e alternativa de maior produtividade), selecionando a condição com melhor desempenho em capacidade, eficiência, fluxo e reuso. Na sequência, serão concluídas as caracterizações (MEV, DRX, FTIR, BET, TGA e ângulo de contato) e executados ensaios óleo/água com diferentes óleos/derivados e variações de pH, salinidade e temperatura, incluindo campanhas de regeneração em ciclos para avaliar estabilidade e integridade mecânica. Como entregáveis, espera-se um protocolo consolidado, curvas de desempenho (g/g, %, ciclos) e um relatório técnico com rota recomendada para avanço da validação.

Referências Essenciais

- Guo Q, et al. Synthesis of disperse amorphous SiO₂ nanoparticles via sol–gel process. *Ceramics International*. 2017;43:192–196. doi:10.1016/j.ceramint.2016.09.133.
- Kao MJ, Hsu FC, Peng DX. Synthesis and characterization of SiO₂ nanoparticles and their efficacy in chemical mechanical polishing steel substrate. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014;2014:Article ID 691967. doi:10.1155/2014/691967.