



Avaliação Comparativa de Custo e Biodegradabilidade de Membranas de Nafion e Quitosana-Óxido de Grafeno para Eletrólise da Água

Maria Fernanda Farias Pontes¹, Vinicius Martins Castro Freire², Diogo Bernardino da Silva³, Santino Loruan Silvestre de Melo⁴, Ênio Pontes de Deus⁵.

¹ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – DEMM, Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga – LAMEFF, Fortaleza – CE, Brasil.

E-mail: pontesmariafernanda79@gmail.com

RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis para uso em aplicações energéticas e ambientais. Dentre eles, a quitosana se destaca por sua origem renovável, baixo custo e biocompatibilidade. Entretanto, seu desempenho em meios aquosos pode ser limitado pela instabilidade estrutural e pela degradação. Este trabalho tem como foco a biodegradabilidade de membranas de quitosana quimicamente modificadas, buscando avaliar como as alterações na matriz polimérica influenciam a estabilidade e a degradação em meio aquoso. Esses aspectos são fundamentais para aplicações em processos eletroquímicos e de separação. Os resultados reforçam o potencial da quitosana como material biodegradável e versátil, destacando sua relevância no desenvolvimento de tecnologias limpas e na contribuição para a produção de hidrogênio verde.

Palavras-chave: Quitosana, biodegradabilidade, membranas poliméricas, hidrogênio verde.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials has encouraged the development of biodegradable polymers for use in energy and environmental applications. Among these, chitosan stands out due to its renewable origin, low cost, and biocompatibility. However, its performance in aqueous environments can be limited by structural instability and degradation. This study focuses on the biodegradability of chemically modified chitosan membranes, aiming to evaluate how modifications in the polymeric matrix affect stability and degradation in aqueous media. These aspects are crucial for applications in electrochemical and separation processes. The findings reinforce the potential of chitosan as a biodegradable and versatile material, highlighting its relevance in clean technologies and its contribution to green hydrogen production.

Keywords: Chitosan, biodegradability, polymeric membranes, green hydrogen.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

INTRODUÇÃO

Atualmente a demanda por fontes de energia limpa vem ampliando o desenvolvimento de pesquisas sobre o hidrogênio verde, produzido pela eletrólise da água. Esse processo é considerado um dos mais promissores para redução da dependência de combustíveis fósseis (derivados do petróleo), visto que o hidrogênio é uma alternativa energética de alta densidade, não poluente em sua utilização e pode ser integrado a diferentes setores industriais.

Nesse contexto, o desempenho dos eletrolisadores depende fortemente das membranas poliméricas de troca protônica (PEM), esses componentes são responsáveis pela condução seletiva de prótons, mantendo a separação entre os gases formados (gás hidrogênio e gás oxigênio). No mercado atual, o material de referência comercial é o Nafion®, uma membrana perfluorosulfonada que apresenta elevada condutividade protônica, estabilidade química e durabilidade. Contudo, seu alto custo de produção (na ordem de 1.000 2.000 USD/m²) e a ausência de biodegradabilidade, decorrente da estrutura perfluorada altamente recalcitrante, levantam preocupações ambientais e econômicas.



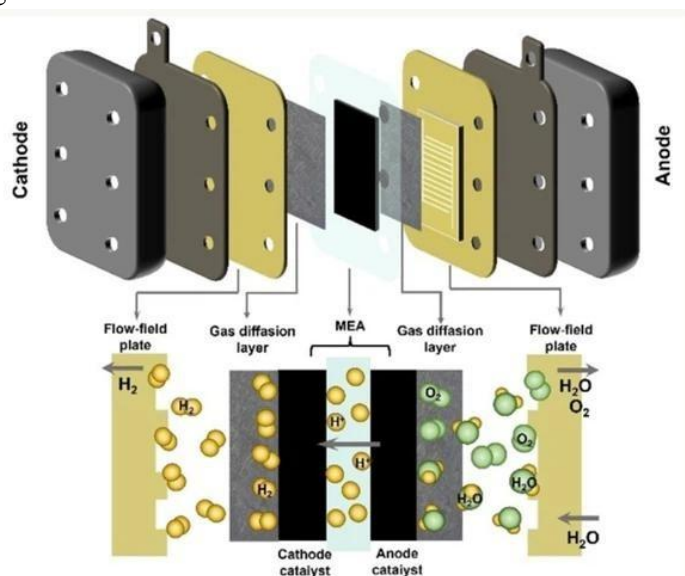
INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Diante dessas limitações, materiais alternativos vêm sendo estudados, com destaque para membranas baseadas em biopolímeros. A quitosana, derivada da quitina (presente em resíduos de crustáceos, matéria prima abundante no litoral do nordeste), é um polímero natural, biodegradável e de baixo custo. Entretanto, sua baixa estabilidade em meio aquoso e condutividade relativamente reduzida exigem modificações químicas e estruturais. Uma das estratégias mais empregadas é a incorporação de óxido de grafeno (OG), que melhora as propriedades mecânicas, a estabilidade e, em alguns casos, contribui para aumentar a condutividade iônica.

Assim, a comparação entre o Nafion e membranas de quitosana/óxido de grafeno (Q-OG) é relevante não apenas em resultados técnicos, mas também sob a perspectiva de sustentabilidade e custo, alinhada às demandas da transição energética.

O eletrolizador do tipo PEM (Membrana de Troca de Prótons) funciona usando uma membrana polimérica sólida para dividir a água em hidrogênio e oxigênio através de uma corrente elétrica. A água reage no para formar oxigênio e íons de hidrogênio (prótons) e elétrons. Os íons de hidrogênio passam através da membrana PEM até o, enquanto os elétrons formam um circuito externo, reunindo-se com os prótons para produzir gás hidrogênio.



what-is-the-function-of-pem-electrolizer-in-hy-68715076.html

METODOLOGIA



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

A pesquisa foi conduzida por meio de análise bibliográfica em bases científicas, abrangendo artigos, relatórios técnicos e revisões recentes. Foram coletadas informações relativas a:

- custos médios de produção de membranas;
- propriedades físico-químicas de interesse para
- eletrólise, biodegradabilidade e impactos
- socioambientais reportados.

Os dados foram sistematizados em forma de tabelas e gráficos, permitindo análise crítica dos pontos fortes e limitações de cada material.

CUSTOS MÉDIOS DE PRODUÇÃO DE MEMBRANAS:

CUSTO DE PRODUÇÃO DE MEMBRANAS EM 2025
EM USD

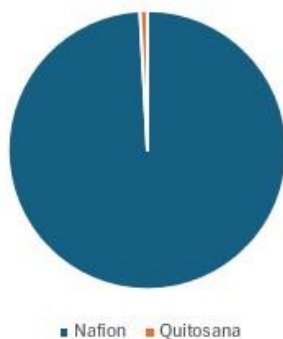


Gráfico 1 mostra o custo de produção gerais aproximados baseados em matéria-prima (sem levar em conta fatores de comercialização) das membranas Nafion (azul) e de Qitosana (laranja) no ano de 2025.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Tabela com dados de 2023 – 2025.

Ano	Nafion (100 kg)	Quitosana (100 kg)
2023	140.000 USD	1.200 USD
2024	145.000 USD	1.250 USD
2025	150.000 USD	1.300 USD

Tabela 1 - Dados de custo de produção.

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE INTERESSE PARA ELETRÓLISE:

Propriedade	Nafion	Quitosana
Origem	Polímero sintético perfluorado.	Natural, derivado da quitina.
Biodegradabilidade	Não biodegradável.	Biodegradável, destacando aplicabilidade sustentável.
Condutividade/ Propriedades iônicas	Nafion com nanocompositos (ZrP, Sílica, GO) alcança condutividade até 0,013 S/cm.	Quitosana/PVA com grafeno condutor alcança condutividade protônica de 1,74 mS/cm (0,00174 S/cm).
Estabilidade mecânica/ Estrutural	Compósitos com sílica e ZrP reduzem inchamento e melhoram resistência mecânica.	Quitosana + PVA revestido com grafeno condutor forma membrana mais robusta e resistente.
Aplicações recentes	PEM para células a combustível; membranas compósitas aprimoradas para	Membranas biodegradáveis para biobaterias, tratamento de água, separação óleo/água, eletrolisadores.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

	alta temperatura/baixo inchamento.	
Custo/ Economia	Estudos de membranas compósitas mais baratos que Nafion puro; ex: PVA-Nafion aproximadamente 11 vezes mais barato.	Quitosana membranas são de baixo custo (química simples, origem renovável).
Impacto ambiental	Persistência de resíduos perfluorado.	Origem sustentável, biodegradável, adota química verde.

Tabela 2 – Comparação de propriedades das membranas.

BIODEGRADABILIDADE E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS REPORTADOS:

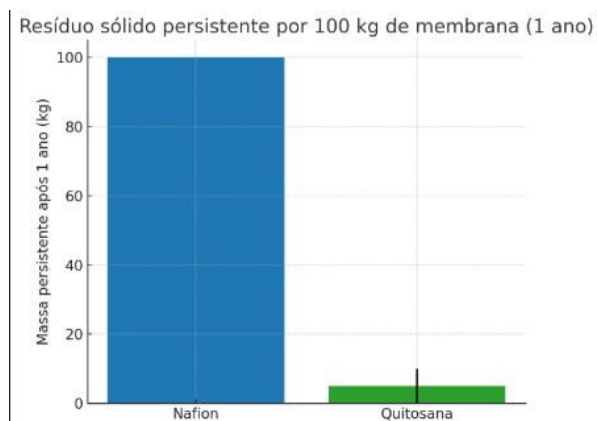




Gráfico 2: O gráfico mostra resíduo sólido gerado por membrana Nafion (azul) e Quitosana (verde) por 100 km de membrana por um ano.

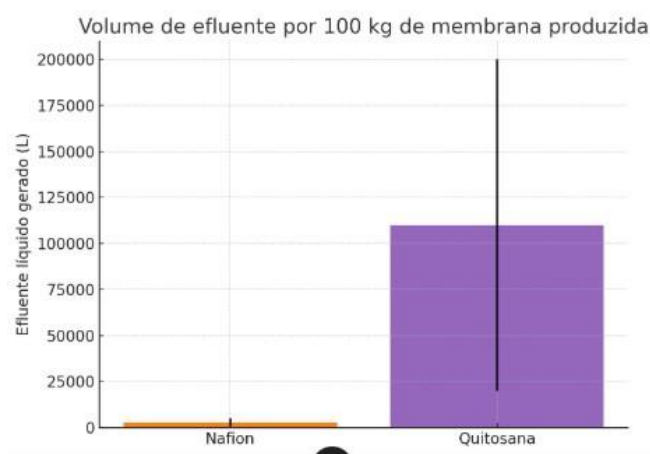


Gráfico 3: O gráfico mostra o volume de efluente nas membranas de Nafion (laranja) e Quitosana (roxo) por 100 km de membrana por um ano

CONCLUSÃO:

A comparação entre as membranas de Nafion e de quitosana nos parâmetros de custo, propriedades físico-químicas, biodegradabilidade e impactos socioambientais. A membrana da Nafion, apesar de ser o material de referência em eletrocatalise e eletrolisadores PEM, apresenta alto custo de produção e, principalmente, baixa sustentabilidade ambiental. Por ser um polímero perfluorado, é praticamente não biodegradável e permanece no ambiente após o descarte, além de estar associado à liberação de resíduos persistentes, como PFAS. Assim, a utilização de Nafion implica em impactos ambientais que geram um contraste com a proposta da geração de energia limpa por meio de eletrolise da água.

No caso da membrana de quitosana, obtida a partir de resíduos da indústria pesqueira, destaca-se como uma opção renovável, de menor custo e com alta biodegradabilidade, degradando-se quase totalmente em condições ambientais dentro de um ano. Essa característica minimiza a geração de resíduos sólidos persistentes e reduz impactos de descarte. No entanto, a etapa de produção de quitosana é intensiva em consumo de água e gera grandes volumes de efluente líquido, especialmente devido ao uso de HCl e NaOH nas etapas de desmineralização e deacetilação. Esse ponto representa um desafio ambiental relevante, mas, ao contrário do problema de descarte da Nafion, pode ser solucionado. Estratégias como a



reciclagem de água e reagentes, a adoção de processos enzimáticos e a implementação de sistemas de circuito fechado já demonstram potencial de reduzir em até 70–90% o volume de efluente gerado, tornando a rota de produção significativamente mais limpa.

Portanto, ao se considerar não apenas o desempenho técnico, mas também os custos, a biodegradabilidade e os impactos socioambientais, as membranas de quitosana se apresentam como uma alternativa promissora ao Nafion. A questão do efluente, embora relevante, é superável por inovações tecnológicas e práticas de produção sustentável, enquanto a persistência ambiental do Nafion permanece como uma limitação crítica sem solução viável. Assim, em uma perspectiva de economia circular e sustentabilidade, a quitosana representa uma escolha estratégica mais alinhada às demandas atuais por materiais verdes e de baixo impacto ambiental.

REFERENCIAS

- Ollot, M., et al. (2016). *An effective, novel and low-cost proton exchange membrane for fuel cells*. ScienceDirect. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X24001701>
- Straits Research. (2023). *Chitosan Market Size, Share, Trend Growth Report to 2033*. Disponível em: <https://straitsresearch.com/report/chitosan-market>
- Kim, H., et al. (2014). *Cost analysis of Nafion membrane for proton exchange membrane fuel cells*. ScienceDirect. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X24001701>
- **RSC (2025)**. *Recent advances in Nafion composite membranes for fuel cells: role of ZrP, silica and graphene oxide*. Royal Society of Chemistry. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ya/d4ya00446a>
- **Brito dos Santos, J. et al. (2024)**. *Biodegradable membranes for sustainable electrochemical devices*. Frontiers in Membrane Science and Technology. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/membrane-science-andtechnology/articles/10.3389/fmst.2025.1552368/full>
- **Wang, Y. et al. (2023)**. *Chitosan-based membranes for wastewater treatment: advances and perspectives*. Environmental Engineering Science.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Disponível em: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ees.2022.0254>

- **Hosseini, S. et al. (2022).** *Chitosan-based membranes for energy and environmental applications: recent progress and future outlook.* International Journal of Biological Macromolecules (via PubMed Central).

Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9807252/>

- **Kumar, R. et al. (2022).** *Recent development of low-cost membranes for microbial fuel cell applications (PVA–Nafion blends).* ResearchGate preprint.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/382984380_A_recent_development_of_lowcost_membranes_for_microbial_fuel_cell_applications