

# MEMBRANAS POLIMÉRICAS DE QUITOSANA/PVA DOPADAS COM ÁCIDO SULFOSUCCÍNICO PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO

<sup>1</sup>MARCELO ROCHA BRAGA, <sup>2</sup>WILLIAM NEVES DA SILVA, <sup>1</sup>FRANCISCO NIVALDO AGUIAR FREIRE, <sup>1</sup>ANA FABIÓLA LEITE ALMEIDA, <sup>3</sup>MANUEL PEDRO FERNANDES GRAÇA

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará (UFC), <sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), <sup>3</sup>Universidade de Aveiro (UA)

<marcelorbrg@outlook.com> <williamrns88@gmail.com> <nivaldo@ufc.br> <anafabiola@ufc.br> <mpfg@ua.pt>

DOI: 10.21439/conexoes.v20.4138

**Resumo.** Este trabalho investiga e põe em prática a fabricação de uma membrana de base orgânica para células a combustível de eletrólito polimérico composta de quitosana e álcool polivinílico e dopada com ácido sulfosuccínico para condução protônica, além da realização de testes para avaliar seu desempenho. Como proposta metodológica, as membranas foram elaboradas seguindo uma mistura de diferentes técnicas, envolvendo a dissolução da quitosana e do álcool polivinílico em uma solução de ácido sulfosuccínico e ácido clorídrico, seguido de secagem e reticulação com ácido sulfúrico. Após sua fabricação, nove amostras foram testadas em um equipamento simples de célula a combustível de hidrogênio e comparadas com uma membrana comercial à base de Nafion®. Os resultados compararam a tensão produzida pela membrana de quitosana com a membrana base de teste e entre variações da mesma membrana, levando à conclusão de que a tensão gerada foi semelhante (cerca de 0,6 volts) e, portanto, reforçando a viabilidade deste composto orgânico de baixo custo como alternativa às membranas disponíveis no mercado.

**Palavras-chave:** célula de combustível; membrana polimérica; materiais orgânicos.

## CHITOSAN/PVA POLYMERIC MEMBRANES DOPED WITH SULFOSUCCINIC ACID FOR APPLICATION IN HYDROGEN FUEL CELLS

**Abstract.** This work investigates and implements the fabrication of an organic-based membrane for polymer electrolyte fuel cells, composed of chitosan and polyvinyl alcohol and doped with sulfosuccinic acid for proton conduction, as well as conducting tests to evaluate its performance. As a methodological proposal, the membranes were produced using a combination of different techniques, involving the dissolution of chitosan and polyvinyl alcohol in a solution of sulfosuccinic acid and hydrochloric acid, followed by drying and crosslinking with sulfuric acid. After preparation, nine of the membranes were tested in a simple hydrogen fuel cell device and compared with a commercial Nafion®-based membrane. The results compared the voltage produced by the chitosan membrane with the reference membrane and between variations of the same membrane, leading to the conclusion that the generated voltage was similar (around 0.6 volts), thus reinforcing the viability of this low-cost organic compound as an alternative to commercially available membranes.

**Keywords:** fuel cells; polymer membrane; organic materials.

## 1 INTRODUÇÃO

Em evidência atualmente no mundo todo está a pauta do desenvolvimento sustentável e a redução da pegada de carbono, simultaneamente com a necessidade da segurança energética e estabilidade econômica. No centro desses temas está a transição para fontes de energia renováveis, que não só é uma boa alternativa para fontes de energia tradicionais, mas também um elemento central para redefinir nosso relacionamento com o meio ambiente (Hassan *et al.*, 2024). Destaca-se entre essas fontes, a alternativa do hidrogênio verde, combustível com grande densidade energética, sem emissões danosas e podendo ser obtido de maneira limpa. O hidrogênio pode ser utilizado de diversas formas, como matéria-prima, reagente químico ou, com frequência, em células a combustível (Oliveira; Beswick; Yan, 2021). Muito se tem estudado acerca dos materiais que podem compor células de combustível de membrana de troca de prótons ou “proton exchange membrane” (PEM), especialmente com o propósito final de comercializar as mesmas e garantir uma boa performance para o equipamento em que é utilizado. Este tipo de tecnologia tem chamado atenção devido às diversas inovações tecnológicas que têm obtido, bem como as diversas aplicações a que pode ser direcionada, como geração de energia estacionária, transporte e sistemas de cogeração de calor e energia. Com potencial significativo para descarbonizar o setor elétrico, visto que tem apenas água como produto de seu funcionamento (Jamal *et al.*, 2023; Qasem, 2024). A composição geral das células tipicamente inclui estruturas formadas por carbono, catalisadores à base de platina e uma membrana condutora de prótons (Weber; Balasubramanian; Das, 2012). Atualmente, há uma ampla gama de materiais utilizados na fabricação dessas membranas, que vão desde polímeros sintéticos, como o Nafion®, até compostos orgânicos diversos. Dentre esses, um exemplo que tem obtido notoriedade recente é a quitosana, por ser um polissacarídeo de grande abundância no meio ambiente, com estrutura rígida, alta cristalinidade e sendo facilmente obtida a partir da quitina presente em cascas de crustáceos e órgãos de moluscos (Rosli *et al.*, 2020). Especialmente vantajoso como material em escala nacional devido a grande presença e consumo de crustáceos na costa brasileira (Produção Agropecuária | IBGE, 2023). Ademais, a presente investigação leva em consideração a versatilidade e as propriedades mecânicas da quitosana para a confecção e teste de uma membrana de célula a combustível de membrana de troca protônica, além de permitir uma análise da resistência desse material e seu desempenho em comparação com uma membrana de Nafion®. Examinando o potencial de um composto orgânico de baixo custo para o mercado de células a combustível, onde se observa uma baixa presença de membranas sustentáveis, porém um crescente interesse em seu estudo (Abouricha *et al.*, 2024).

## 2 METODOLOGIA

O trabalho utilizou diferentes abordagens para a fabricação da membrana de quitosana em combinação com álcool polivinílico (PVA), seguindo sempre uma metodologia similar à descrita por Witt *et al.* (2010). Também foi incorporada parte da metodologia de Lupatini *et al.* (2016) com o objetivo de melhorar as propriedades de condução da membrana.

### 2.1 Materiais e métodos

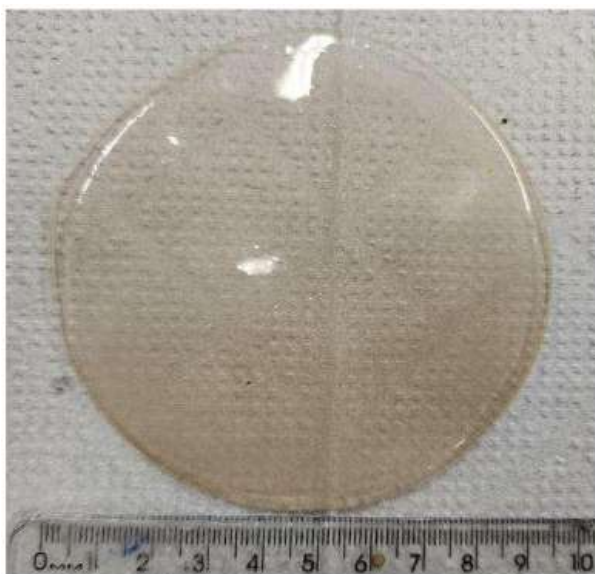
Para o processo de preparação, foram utilizados: Quitosana em pó (SIGMA-ALDRICH), grau de desacetilação  $\geq 75\%$ , álcool polivinílico (PVA) (SIGMA-ALDRICH), ácido clorídrico (SYNTH), ácido sulfosuccínico (SSA) (SIGMA-ALDRICH) e ácido sulfúrico (SYNTH). Esses reagentes foram empregados na fabricação das membranas. Um kit de testes de células a combustível de hidrogênio do tipo PEM foi adquirido da WSkits, sendo utilizado para avaliação do desempenho das membranas e monitoramento de suas características eletroquímicas. O kit inclui um eletrolisador simples, uma célula a combustível PEM pré-montada e instrumentos analógicos (voltímetro e amperímetro) conectados a um pequeno motor demonstrativo. Para as aferições, foi utilizado um amperímetro digital.

### 2.2 Preparação das membranas

O método de fabricação das membranas seguiu a abordagem descrita por Witt *et al.* (2010), com algumas modificações. Segundo os autores, utilizou-se uma mistura de quitosana com PVA e uma proporção de 8 a 80% de ácido sulfosuccínico em relação à quantidade de grupos amino (-NH<sub>2</sub>). Para simplificar, adotou-se um valor médio equivalente a aproximadamente 0,7 mL de SSA por 1 g de quitosana. Além disso, Lupatini *et al.* (2016)

demonstraram que o pré-tratamento da membrana com solução aquosa de ácido sulfúrico (1 a 4 mol/L) pode aumentar sua condutividade protônica, o que foi considerado nesta pesquisa. No processo, foram elaborados três padrões de membranas que variam na quantidade de quitosana e ácido sulfosuccínico de modo a testar ajustes finos na composição. Em geral, utilizou-se cerca de 1 g de quitosana em 50 mL de água, 0,2 mL de HCl a 38% e variações entre 0,5 a 1 mL de ácido sulfosuccínico a 70%, a 50 °C. Simultaneamente, preparou-se uma solução com 2 g de PVA em 50 mL de água, aquecida a 90 °C. Após o resfriamento das soluções para 50 °C em agitador magnético, elas foram misturadas e distribuídas em placas de Petri, sendo posteriormente submetidas à secagem em estufa a 80 °C por 3 horas ou à temperatura ambiente até completa evaporação da água, analisando-se também a influência dos métodos de secagem na formação de bolhas. As membranas obtidas apresentaram aspecto plástico homogêneo. Um volume de 100 mL dessa mistura pode ser dividido em quantidades diferentes, para diâmetros maiores de placas petri, foram utilizados 50 mL em 2 placas com aproximadamente 12 cm de diâmetro, já para outras divisões como moldes de 10 cm de diâmetro foram utilizados 40 mL da mistura e o remanescente em mais 2 placas de diâmetros menores entre 7 e 9 cm de diâmetro. Nove membranas dentre os três padrões foram produzidas ao todo para serem utilizadas em testes e análises. Com esse método, as membranas já se encontram aptas à condução protônica, graças à presença dos ácidos sulfosuccínico e clorídrico. Na Figura 1, observa-se a estrutura resultante da membrana produzida com 40 mL da solução depositada em placa de Petri de 10 cm de diâmetro. Após a evaporação da água, há significativa redução de volume, conferindo à membrana o aspecto de um filme plástico fino.

**Figura 1:** Membrana de quitosana/PVA dopada com ácido sulfosuccínico.



Fonte: Autores (2025).

O filme apresenta coloração alaranjada, estrutura flexível e transparência. O protótipo, assim como é característico das membranas de troca protônica (PEM), possui natureza hidrofílica, isto é, afinidade por líquidos como a água. Após imersão em água destilada, mantém consistência viscosa, semelhante a um gel, característica também observada em membranas comerciais como as de Nafion®. A espessura média das membranas não dopadas é de cerca de 0,29 mm.

### 2.3 Dopagem das membranas

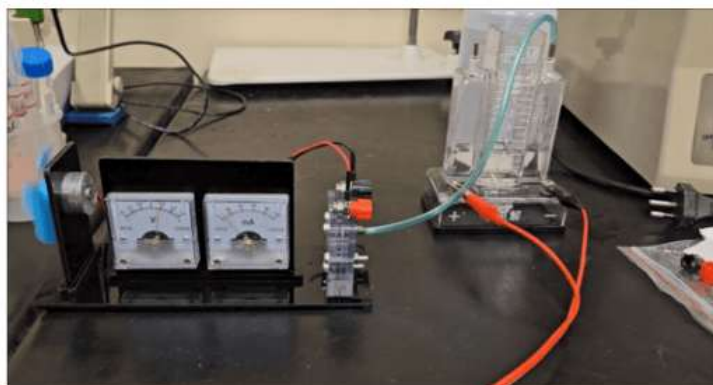
Para as membranas dopadas com ácido sulfosuccínico, segundo Witt (2010), estas já apresentam capacidade de condução de prótons em níveis aceitáveis. No entanto, Elhakim *et al.* (2019) demonstraram que a reticulação com ácido sulfúrico pode melhorar essa propriedade, relatando aumento na condutividade iônica após sulfonação da membrana em solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 1 mol/L.

Algumas membranas produzidas foram, portanto, inicialmente imersas em 100 mL de solução 1 mol/L de  $H_2SO_4$  por 1 hora, e outra amostra foi submetida à imersão em solução 4 mol/L por aproximadamente 18 horas. Após esse processo, as membranas foram neutralizadas com solução 1 mol/L de hidróxido de sódio, como pré-tratamento para intensificar sua condutividade protônica (Lupatini *et al.*, 2016). Após a imersão completa de um dos protótipos de membrana de SSA e quitosana, observou-se que sua estrutura geral foi mantida, apenas com leve redução de espessura, chegando a cerca de 0,25 mm. Acredita-se que sua capacidade de atuar como barreira aos reagentes permaneceu preservada.

## 2.4 Incorporação da membrana em célula e teste

Para a testagem da membrana, foram consideradas diferentes metodologias descritas na literatura. Witt (2010) empregou uma célula de vidro para eletrólise, utilizando dois eletrodos de platina imersos em solução de  $H_2SO_4$ , na qual a resistência elétrica e a diferença de potencial da membrana foram determinadas por meio de eletrodos de referência posicionados nas proximidades de sua superfície, com o auxílio de capilares de Luggin. Investigações experimentais semelhantes, baseados no posicionamento de eletrodos de referência próximos à membrana para a minimização de perdas ôhmicas não compensadas, também são reportados em estudos mais recentes, como os de Zhao e Duan (2022) e Yu *et al.* (2024). Já Melo (2024) elaborou um eletrolisador no qual a membrana de quitosana foi posicionada entre malhas condutivas e separando as soluções do cátodo e do ânodo, de modo a funcionar de forma análoga a uma célula a combustível, medindo-se a tensão entre os terminais do cátodo e do ânodo. Para o presente experimento, optou-se por avaliar o desempenho da membrana de forma mais alinhada à sua aplicação prática. Foi utilizada, portanto, uma bancada de testes de células a combustível, fornecida pela WSKits, composta por um eletrolisador, uma célula funcional com membrana própria e um voltímetro conectado a um pequeno rotor para fins demonstrativos. O conjunto experimental está ilustrado na Figura 2.

**Figura 2:** Estação de teste de célula de combustível.

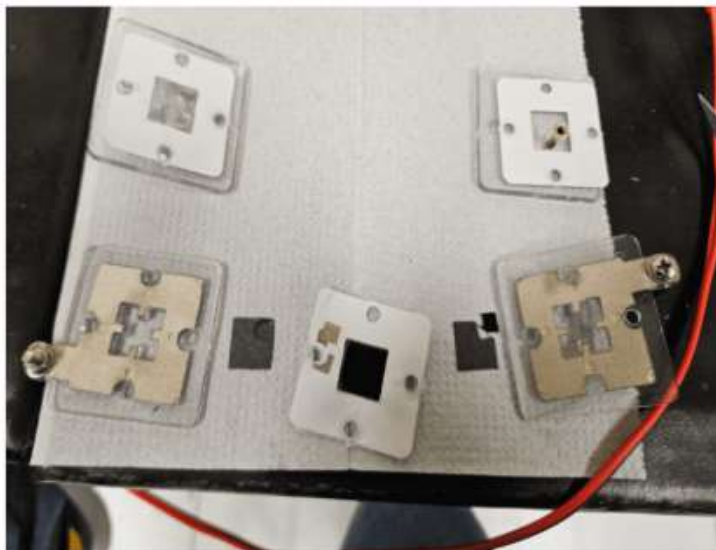


Fonte: Autores (2025).

Para demonstrar o funcionamento da célula, o eletrolisador foi preenchido com água deionizada e conectado a um tubo de transferência que conduz o hidrogênio gerado até a célula a combustível. Em seguida, o eletrolisador foi ligado a uma fonte de tensão entre 8 e 12 V, conforme as especificações do kit. Após alguns instantes, iniciou-se o processo de eletrólise, resultando em fluxo contínuo de hidrogênio para a célula. Os coletores de corrente da célula foram conectados inicialmente ao voltímetro fornecido no kit para demonstração, mas, visando maior precisão, foi utilizada a conexão com um multímetro digital. A tensão máxima especificada para a célula pode ser alcançada cerca de três minutos após o início da eletrólise e do fornecimento de hidrogênio. A célula permite desmontagem para substituição da membrana e demais componentes. A estrutura interna está representada na Figura 3.

Para este trabalho, realizou-se apenas a substituição da membrana eletrolítica. Em relação à membrana padrão de teste, os valores médios de tensão e corrente observados foram de aproximadamente 0,7 V e 50 mA, sendo utilizados como parâmetros de comparação.

**Figura 3:** Célula de combustível de teste desmontada.



Fonte: Autores (2025).

### 3 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o experimento, incluindo o detalhamento do desempenho das membranas produzidas.

#### 3.1 Membranas confeccionadas

Esta subseção descreve as membranas confeccionadas, os materiais utilizados e a metodologia de secagem adotada. Todas as membranas foram preparadas de forma semelhante, com base na metodologia de Zhang *et al.* (2009), utilizando agitação constante a 50 °C em agitador mecânico até a obtenção de solução homogênea. Os resultados da formação das membranas estão resumidos na Tabela 1.

Algumas das membranas dopadas com SSA foram também submetidas a tratamento adicional com soluções de ácido sulfúrico entre 1 mol/L e 4 mol/L por cerca de 18 horas, seguindo um método modificado de Lupatini *et al.* (2016), com o objetivo de melhorar suas propriedades de condução de prótons. As membranas formadas não receberam camada catalisadora à base de platina, como ocorre com a membrana padrão de teste. Devido a isso, apresentam baixa condutividade de corrente elétrica, embora sejam capazes de gerar tensão. Neste trabalho, será avaliada apenas a voltagem gerada pelas membranas.

#### 3.2 Resultados dos testes em célula de combustível

Utilizando o kit descrito anteriormente para os testes com células a combustível do tipo PEM, a membrana padrão da célula foi substituída por uma das membranas de quitosana dopada com SSA e reticulada com ácido sulfúrico. Apenas a membrana de condução protônica foi substituída, mantendo-se o restante da estrutura da célula inalterada. O eletrolisador foi alimentado com tensão de 10 V em todos os testes. Como resultado, mantendo as mesmas condições da configuração padrão, a membrana experimental gerou tensão de aproximadamente 0,63 V logo no início do teste, mantendo-se estável em torno desse valor, conforme mostrado na Figura 4. No entanto, não foram registrados valores significativos de corrente, atingindo no máximo 4  $\mu$ A, provavelmente devido à ausência de camada catalisadora na membrana experimental, uma vez que a membrana de referência possui catalisador incorporado.

Repetidos testes com membranas fabricadas segundo a mesma metodologia apresentaram resultados semelhantes. Entretanto, devido ao desgaste de materiais, como as folhas de grafite localizadas entre a membrana e a camada condutiva, as tensões geradas passaram a se manter em torno de 0,5 V. A membrana padrão também teve seu de-

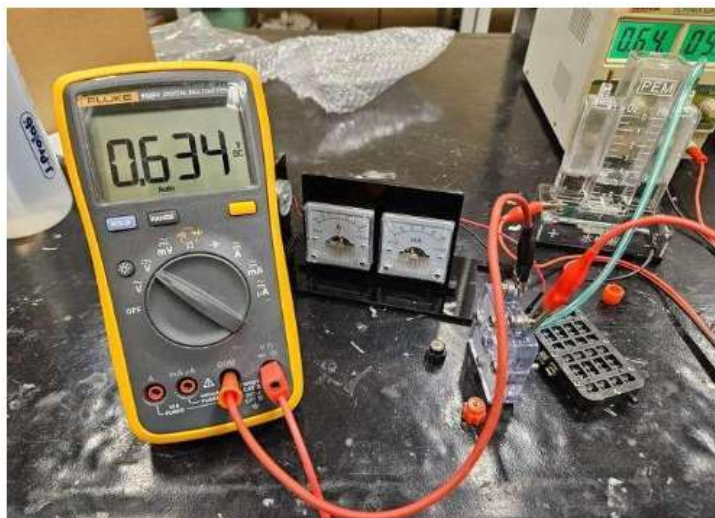
MEMBRANAS POLIMÉRICAS DE QUITOSANA/PVA DOPADAS COM ÁCIDO SULFOSUCCÍNICO PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO

Tabela 1: Membranas Confeccionadas

Código	Solução de Quitosana	Solução de PVA	Volume da membrana	Metodologia	Resultado
MS1	0,5 g em 50 ml de água + 0,2 ml de HCL 38% + 0,5 ml de Ácido sulfosuccinico 70%	2 g em 50 ml de água	Moldes de 20, 30 e 40 ml	Despejar em placa petri, em uma estufa a 80° C por 3 horas e deixar esfriar por 24 horas a temperatura ambiente.	Formação da membrana, feito a dopagem com ácido sulfúrico por uma hora.
MS2	1 g em 50 ml de água + 0,3 ml de HCL 38% + 0,7 ml de Ácido sulfosuccinico 70%	2,5 g em 50 ml de água	Dois moldes com aprox 50 ml	Despejar em placas petri e deixar secar à temperatura ambiente por aproximadamente 1 semana.	Formação da membrana, com características mais rígidas, dopagem com ácido sulfúrico por 1 hora em uma delas.
MS3	2 g em 100 ml de água + 0,6 ml de HCL 38% + 2 ml de Ácido sulfosuccinico 70%	5 g em 100 ml de água	Quatro moldes com aprox 50 ml	Despejar em placas petri e deixar secar à temperatura ambiente por aproximadamente 1 semana.	Formação da membrana, com características mais rígidas, dopagem com ácido sulfúrico por 18 horas em uma delas.

Fonte: Autores (2025).

Figura 4: Estação de teste de célula de combustível.



Fonte: Autores (2025).

sempenho comprometido após sucessivos testes, gerando 0,4 V e 15 mA na segunda rodada experimental. Foram também comparadas membranas reticuladas com ácido sulfúrico, inicialmente utilizando solução de 1 mol/L por uma hora. As variações na tensão gerada foram mínimas, embora tenha sido observada uma leve melhora. Na sequência, aplicou-se o procedimento de reticulação descrito por Lupatini *et al.* (2016), com imersão da membrana em solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 4 mol/L por aproximadamente 18 horas. Após os testes, observaram-se alterações pouco

significativas na tensão gerada. Os resultados obtidos com os testes estão sintetizados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Resultados dos testes com membranas dopadas e não-dopadas.

Data	Código	Membrana	Tensão (V)	Corrente (mA)
27/09/2024	-	Padrão de teste, Nafion® com catalisador de platina	0,731	50
27/09/2024	MS1	Quitosana/PVA-SSA, reticulado com 1 Mol/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> por 1 hora, sem catalisador	0,634	0,004
27/01/2025	-	Padrão de teste, Nafion com catalisador de platina	0,430	15
29/01/2025	MS2	Quitosana/PVA-SSA, reticulado com 1 Mol/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> por 1 hora, sem catalisador	0,530	0,004
29/01/2025	MS2	Quitosana/PVA-SSA, não reticulado, sem catalisador	0,514	0,004
01/04/2025	MS3	Quitosana/PVA-SSA, reticulado com 4 Mol/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> por 18 horas, sem catalisador	0,566	0,000
01/04/2025	MS3	Quitosana/PVA-SSA, não reticulado, sem catalisador	0,560	0,000

Fonte: Autores (2025).

Comparando com valores na literatura, em que se observa voltagens em torno de 0.6 V, variando com as perdas de voltagens por motivos distintos, observa-se que tanto a membrana padrão de teste, quanto as membranas de quitosana operaram nos padrões esperados (Larmine; Dicks, 2003).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados demonstraram a viabilidade das membranas produzidas e dopadas conforme a metodologia proposta, mantendo desempenho compatível com o relatado na literatura para células a combustível com base em quitosana, com valores variando entre 0,5 e 1 volt (Wan *et al.*, 2006). Observou-se que os melhores resultados ocorreram nos primeiros testes, alcançando valores próximos aos da membrana padrão. Esse comportamento se deve, como mencionado anteriormente, ao desgaste de componentes internos da célula ao longo dos ensaios. Cabe destacar também que as membranas testadas não possuem camada catalisadora, a qual potencializaria ainda mais a geração de tensão (Mohanta *et al.*, 2020). Mesmo assim, os resultados evidenciam o potencial desse material em competir com membranas de Nafion® e outros produtos comerciais. As vantagens do material incluem, além de sua natureza orgânica e sustentável derivada de resíduos da indústria alimentícia, sua estabilidade química, propriedades mecânicas e versatilidade. Ainda que a quitosana pura não apresente elevada condutividade iônica, essa pode ser significativamente aprimorada por meio da combinação com aditivos e compostos auxiliares (Dobi; Mir, 2024), como foi verificado ao longo deste estudo. O estudo da quitosana é igualmente relevante para o avanço tecnológico nacional, especialmente em países como o Brasil, com extensa costa e produção significativa de crustáceos. Em 2023, por exemplo, a produção interna de camarão atingiu 127 mil toneladas, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Produção Agropecuária | IBGE, 2023).

#### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes foram conduzidos com o objetivo de avaliar o desempenho da membrana em sua principal aplicação, e os resultados demonstraram que os objetivos foram plenamente alcançados. Foi obtida geração de tensão satisfatória mesmo sem a presença de uma camada catalisadora, evidenciando o potencial de aplicação da membrana em células a combustível de eletrólito polimérico. Como evidenciado nos resultados, as membranas produzidas apresentaram ótimo desempenho em comparação ao padrão de teste, reforçando a ideia de que este material pode ser adotado e aprimorado como alternativa viável, econômica e, sobretudo, sustentável em relação às membranas convencionais. Trata-se de um material reciclado e orgânico, obtido a partir de resíduos industriais. Esse desempenho pode ser ainda mais otimizado com a adição de catalisador e adequação da célula à estrutura da membrana, com perspectivas futuras de trabalhos ainda mais detalhados sobre como explorar ainda mais este composto para uma geração de energia otimizada. Além de uma maior variedade de análises estruturais como microscopia eletrônica

de Varredura (MEV) e difração de raios X (DRX), por exemplo, para um estudo mais aprofundado da estrutura e sua resistência mecânica conforme aplicação nos testes de performance.

## REFERÊNCIAS

- ABOURICHA, S. *et al.* Biopolymers-based proton exchange membranes for fuel cell applications: A comprehensive review. **ChemElectroChem**, v. 11, n. 9, p. e202300648, 2024. Disponível em: <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com>.
- DOOBI, F. A.; MIR, F. Q. Exploring the development of natural biopolymer (chitosan)-based proton exchange membranes for fuel cells: A review. **Results in Surfaces and Interfaces**, v. 15, p. 100218, 2024.
- ELHAKIM, A. A. A. *et al.* Preparation and characterization of proton exchange membrane by uv photografting technique. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 23, n. 10, p. 2813–2824, 2019.
- HASSAN, Q. *et al.* The renewable energy role in the global energy transformations. **Renewable Energy Focus**, v. 48, p. 100545, 2024.
- IBGE. **Produção Agropecuária: Camarão**. 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/camarao/br>.
- JAMAL, T. *et al.* Fuelling the future: An in-depth review of recent trends, challenges and opportunities of hydrogen fuel cell for a sustainable hydrogen economy. **Energy Reports**, v. 10, p. 2103–2127, 2023.
- LARMINIE, J.; DICKS, A. **Fuel Cell Systems Explained**. 1. ed. EUA: Wiley, 2003.
- LUPATINI, K. N.; SCHAFFER, J. V.; MACHADO, B.; SILVA, E. S. d.; ELLENDERSEN, L. S. N.; MUNIZ, G. I. B.; FERRACIN, R. J.; ALVES, H. J. Development of chitosan membranes for use in pem fuel cells. *In: 2nd International Seminar on Industrial Innovation in Electrochemistry*. Paraná: SENAI, 2016. v. 4, n. 1, p. 103–116.
- MELO, S. L. S. **Compósitos de quitosana aditivados com nanocelulose e óxido de grafeno (GO) para eletrolisadores PEM**. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais)) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- MOHANTA, P. K. *et al.* Impact of membrane types and catalyst layers composition on performance of polymer electrolyte membrane fuel cells. **ChemistryOpen**, v. 9, n. 5, p. 607–615, 2020.
- OLIVEIRA, A. M.; BESWICK, R. R.; YAN, Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 33, p. 100701, 2021.
- QASEM, N. A. A recent overview of proton exchange membrane fuel cells: Fundamentals, applications, and advances. **Applied Thermal Engineering**, v. 252, p. 123746, 2024.
- ROSLI, N. A. H. *et al.* Review of chitosan-based polymers as proton exchange membranes and roles of chitosan-supported ionic liquids. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 2, p. 632, 2020.
- WAN, Y. *et al.* Preliminary evaluation of an alkaline chitosan-based membrane fuel cell. **Journal of Power Sources**, v. 162, n. 1, p. 105–113, 2006.
- WEBER, A. Z.; BALASUBRAMANIAN, S.; DAS, P. K. Proton exchange membrane fuel cells. *In: Advances in Chemical Engineering*. EUA: Academic Press, 2012. v. 41, p. 65–144.
- WITT, M. A. *et al.* Crosslinked chitosan/poly (vinyl alcohol) blends with proton conductivity characteristic. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 21, n. 9, p. 1692–1698, 2010.
- YU, W.; ZHANG, Z.; LUO, F.; LI, X.; DUAN, F.; XU, Y.; LIU, Z.; LIANG, X.; WANG, Y.; WU, L. Tailoring high-performance bipolar membrane for durable pure water electrolysis. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 10220, 2024.
- ZHANG, Y. *et al.* Implantation of nafion® ionomer into polyvinyl alcohol/chitosan composites to form novel proton-conducting membranes for direct methanol fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 194, n. 2, p. 730–736, 2009.
- ZHAO, Y.; DUAN, L. Research on measuring pure membrane electrical resistance under the effects of salinity gradients and diffusion boundary layer and double layer resistances. **Membranes**, v. 12, n. 8, p. 816, 2022.