

GERAÇÃO DE ENERGIA OSMÓTICA EM NANOESCALA: AVANÇOS EM MEMBRANAS NANOFLUÍDICAS 2D E O CONCEITO DE "HIDRELÉTRICA INVISÍVEL"

João Gabriel Silva Pinto¹, Felipe Santos da Silva Flores Lopes²

¹Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Brasil (joaogabielpinto@gmail.com)

²Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Brasil (felipeflores1913@gmail.com).

Resumo: A energia de gradiente de salinidade atua como uma "hidrelétrica invisível" contínua. Esta revisão analisa os avanços em membranas nanofluídicas na Eletrodialise Reversa (RED). A adoção de arquiteturas 2D (MXenes) e matrizes naturais (nanocelulose) superou o limite termodinâmico entre permeabilidade e seletividade iônica. Apesar das potências recordes em laboratório, a escala comercial exige superar a polarização de concentração e o transporte de íons multivalentes.

Palavras-chave: Energia osmótica; Eletrodialise reversa; Membranas nanofluídicas; Materiais 2D; Nanocelulose.

INTRODUÇÃO

A crescente busca por fontes de energia renováveis, impulsionada pela necessidade de mitigar as mudanças climáticas decorrentes da combustão de combustíveis fósseis, tem colocado a energia de gradiente de salinidade, a "energia azul", em uma posição de destaque. Ao contrário da intermitência inerente à energia solar e eólica, o gradiente osmótico entre estuários de rios e o oceano oferece uma fonte de energia de base ininterrupta, capaz de suprir uma parcela significativa da demanda elétrica global. Este potencial pode ser visto como uma autêntica "hidrelétrica invisível", um recurso vasto e silencioso que aguarda o devido amadurecimento tecnológico (Rastgar et al., 2023).

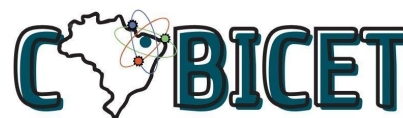
Atualmente, o domínio desse potencial concentra-se em métodos baseados em membranas, com destaque para a Osmose Retardada por Pressão (PRO) e a Eletrodialise Reversa (RED). A tecnologia PRO, por exemplo, utiliza a pressão osmótica natural para forçar a permeação de água através de membranas semipermeáveis, convertendo essa energia em trabalho mecânico via turbinas (Kim et al., 2015). Apesar de promissora, a implementação em larga escala de plantas PRO e RED enfrenta gargalos técnicos consideráveis. A eficácia desses sistemas é limitada pela performance das membranas poliméricas convencionais, que frequentemente falham em equilibrar a seletividade iônica com a permeabilidade ao fluxo, restringindo a eficiência de conversão de energia necessária para a viabilidade econômica (DuChanois et al., 2021; Zhang et al., 2021).

O desafio central para a comercialização dessas tecnologias reside na superação das limitações dos materiais tradicionais. Fenômenos como a polarização de concentração (CP) e o *fouling* das membranas prejudicam severamente a densidade de potência em sistemas operacionais, tornando urgente o desenvolvimento de membranas nanofluídicas avançadas (Tong et al., 2021). Essas novas arquiteturas, projetadas com precisão em nanoescala, prometem não apenas reduzir a resistência interna, mas também oferecer seletividades superiores através de canais nanofluídicos sob medida (Laucirica et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Diante desse cenário, o presente trabalho revisa o estado da arte das membranas nanofluídicas bidimensionais e de base natural. Analisamos como a manipulação de propriedades geométricas e físico-químicas, como a densidade de carga superficial e a estrutura de poros, viabiliza um controle inédito sobre o transporte iônico. Por fim, discutimos a influência de estímulos físicos externos na amplificação energética e os desafios operacionais impostos por águas naturais, validando de forma crítica a eficácia e a escalabilidade deste conceito de "hidrelétrica invisível".

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza analítica. Para responder ao desafio de viabilizar o conceito de "hidrelétrica invisível", a metodologia adotada foca na síntese e análise de modelos termodinâmicos e físico-químicos



aplicados a sistemas de Eletrodialise Reversa (RED). O objetivo é correlacionar as métricas de desempenho das membranas macroscópicas comerciais com os recentes avanços estruturais em membranas nanofluídicas bidimensionais, garantindo que a avaliação de viabilidade seja fundamentada nos fenômenos de transporte em escala nanométrica.

A quantificação de perdas e da eficiência termodinâmica do processo baseia-se na metodologia estabelecida para membranas comerciais (Veerman et al., 2009). Para avaliar o desempenho do sistema, utiliza-se a eficiência termodinâmica, que relaciona a energia elétrica gerada com a diferença de energia dos fluxos de água. Essa análise é complementada pelos modelos termodinâmicos, que diferenciam processos reversíveis, onde o trabalho máximo extraível iguala a energia livre de mistura de Gibbs, de processos irreversíveis (Yip et al., 2014). Nestes últimos, que visam maximizar a densidade de potência, quantificam-se as dissipações de energia resultantes da resistência interna da pilha eletrodialítica.

No que tange aos fenômenos de transporte em nanoescala, a revisão apoia-se no mecanismo fundamental no qual a seletividade iônica é governada pelas cargas superficiais dos nanocanais (Kim et al., 2010). O transporte seletivo sob um gradiente de salinidade gera um potencial de difusão (E_{diff}), cuja avaliação quantitativa é determinada pela equação:

$$E_{diff} = (2t_+ - 1) \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{\gamma_H c_H}{\gamma_L c_L} \right) \quad (1)$$

Onde t_+ é o número de transferência catiônica (indicador central de seletividade), R a constante universal dos gases, T a temperatura absoluta, z a valência, F a constante de Faraday, e γ e c representam os coeficientes de atividade e as concentrações das soluções de alta (H) e baixa (L) salinidade.

Para o comportamento em nanoporos ultrafinos, o estudo adota a modelação físico-química (Cao et al., 2018). Baseado nas equações de Poisson e Nernst-Planck, este modelo demonstra que a corrente de difusão e a seletividade originam-se, primordialmente, na separação de cargas da dupla

camada elétrica (EDL) na superfície externa da membrana. A eficácia dessa seletividade é extraída através da relação das correntes de transporte:

$$t_+ = \frac{I_+}{|I_+| + |I_-|} \quad (2)$$

Onde I_+ e I_- representam as correntes de difusão de cátions e ânions, respectivamente. Por fim, a análise metodológica da otimização estrutural segue as diretrizes de nanoarquitetônica (Wang et al., 2024). Essa abordagem orienta a extração de dados sobre como parâmetros críticos, como a densidade de poros, a espessura da membrana e a carga superficial, devem ser balanceados para mitigar a resistência ao transporte e suprimir a polarização de concentração (CP), fatores determinantes para a escalabilidade da tecnologia sem perda de potência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estado da arte das membranas nanofluídicas para a conversão de energia osmótica pode ser dividido em três frentes principais: materiais 2D sintéticos (como os MXenes), materiais de base natural (como a celulose) e estratégias avançadas de aprimoramento estrutural.

1. Avanços em Membranas Nanofluídicas Bidimensionais: O Paradigma dos MXenes e Arquiteturas Heterogêneas

A eficácia da geração de energia osmótica em dispositivos baseados em materiais 2D é fundamentada nos mecanismos eletrocínéticos de transporte confinado em membranas de espessura atômica. Em escalas subnanométricas, o fluxo de água e de íons escala inversamente com a espessura da membrana. Materiais com espessura nanométrica reduzem o percurso de difusão iônica para distâncias ínfimas, o que minimiza drasticamente a resistência de transporte interno e proporciona uma combinação superior de permeabilidade e seletividade, contornando a severa dissipação de energia comum em membranas poliméricas espessas tradicionais (Pakulski et al., 2019).

Dentro deste paradigma, os MXenes, especificamente as membranas lamelares de carbeto de titânio ($Ti_3C_2T_x$), destacam-se por formarem canais subnanométricos contínuos e altamente ordenados. O transporte iônico nestes canais não é apenas físico, mas fortemente governado pela química de superfície. A presença de grupos terminais nativos hidrofílicos (como $-O$, $-OH$ e $-F$), originados no processo de síntese, atua de duas formas simultâneas:

funciona como pilares espaçadores que mantêm a estabilidade da estrutura lamelar e fornece uma densidade abundante de cargas superficiais negativas. Essa arquitetura garante uma seletividade catiônica excepcional e facilita a manutenção das camadas de hidratação, permitindo um fluxo iônico ultrarrápido que eleva de forma expressiva a densidade de energia convertida (Hong et al., 2019).

Para maximizar essa extração de energia, o controle eletrostático espacial das membranas tem sido uma estratégia central. O desenvolvimento de sistemas heterogêneos compostos por canais nanofluidicos 2D de MXene com funcionalizações de cargas opostas (uma membrana com carga negativa acoplada diretamente a outra com carga positiva) permite a criação de um gerador osmótico com comportamento de retificação análogo a um diodo iônico (junção p-n). Esta configuração direcional induz a formação de um campo elétrico interno na interface, o qual impulsiona o transporte de contra-íons no sentido preferencial e bloqueia rigorosamente o vazamento reverso de co-íons. Esse arranjo otimiza a separação de cargas e resulta num salto substancial de eficiência e densidade de potência sob operação contínua, aproximando a tecnologia dos limiares de viabilidade comercial (Ding et al., 2020).

Apesar do elevado desempenho inicial, membranas 2D homogêneas apresentam frequentemente limitações operacionais devido à severa CP nas suas interfaces. O acúmulo local de íons degrada o gradiente osmótico efetivo na superfície do material, prejudicando a força motriz para a difusão sob confinamento. Para mitigar esse efeito, arquiteturas assimétricas inteligentes têm sido construídas através de membranas heterogêneas que combinam a camada seletiva de MXene com polímeros de bloco responsivos, como o PS-b-P2VP. Essa assimetria estrutural e de cargas, modulável por estímulos externos de pH, altera dinamicamente a conformação espacial dos poros poliméricos (expandindo ou contraindo). Esse mecanismo atua como um "portão" iônico dinâmico que não apenas atenua a polarização de concentração ao quebrar a simetria do sistema, mas também amplifica as taxas de fluxo iônico direcional (Lin et al., 2021).

Por fim, inovações estruturais recentes têm quebrado o histórico compromisso (*trade-off*) entre seletividade e permeabilidade anatômica através da intercalação de estruturas metal-orgânicas (MOFs), como o ZIF-8, entre as nanofolhas de MXene. A inserção de nanopartículas de MOF resolve o problema crítico do reempilhamento das lamelas de MXene, atuando como suportes mecânicos robustos. Simultaneamente, as janelas de tamanho angstrom dos cristais de ZIF-8 atuam como filtros rigorosos de

exclusão por tamanho físico para íons hidratados. Em paralelo, a intercalação reduz e estabiliza o espaçamento interlamelar de maneira extremamente precisa, o que encurta a tortuosidade da via de transporte e maximiza a sobreposição da EDL. A sinergia destas propriedades permite que o sistema alcance eficiências termodinâmicas e densidades de potência sem precedentes na captura da energia azul (Zhou et al., 2022).

Para consolidar a progressão tecnológica ditada por estas estratégias de engenharia de materiais, a Tabela 1 sintetiza a evolução arquitetônica e os respectivos saltos de desempenho reportados na literatura em diferentes configurações operacionais.

Tabela 1. Evolução arquitetônica e desempenho de membranas baseadas em MXene.

Arquitetura da Membrana	Material Base	Densidade de Potência (Wm^{-2})
Homogênea 2D	MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$	21,0 a 54,0
Diódica 2D	MXenes com cargas opostas	4,6
Heterogênea Responsiva	MXene / Polímero PS-b-P2VP	6,74
Híbrida Intercalada	MXene / MOF ZIF-8	48,05

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hong et al. (2019), Ding et al. (2020), Lin et al. (2021) e Zhou et al. (2022).

A análise cruzada dos dados compilados na Tabela 1 ilustra de forma clara o impacto das inovações morfológicas na capacidade de geração elétrica. Observa-se que as arquiteturas diódicas e heterogêneas poliméricas, focadas primordialmente na estabilidade retificadora e na supressão do transporte de co-íons, entregam potências base consistentes na faixa de 4,6 a 6,74 Wm^{-2} (Ding et al., 2020; Lin et al., 2021). No entanto, a arquitetura híbrida intercalada por MOFs representa um paradigma superior de engenharia estrutural. Ao aliar a triagem subnanométrica do ZIF-8 com o alinhamento rigoroso dos canais de transporte do MXene, a membrana híbrida é capaz de sustentar uma operação sob gradientes salinos extremos, resultando num ganho exponencial na densidade de potência máxima, na ordem dos 48,05 Wm^{-2} (Zhou et al., 2022). Esse comportamento evidencia que o controle arquitetônico simultâneo sobre o espaçamento interlamelar e a porosidade seletiva

constitui a via definitiva para escalar a tecnologia RED.

2. Alternativas Sustentáveis e Naturais

A transição para a sustentabilidade e a viabilidade comercial em larga escala exige a substituição de precursores sintéticos onerosos por matérias-primas naturais e abundantes. Neste contexto, membranas nanofluídicas 2D totalmente naturais demonstraram um desempenho de excelência aliado a um balanço de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) altamente favorável. Comparadas às tradicionais membranas baseadas em óxido de grafeno (GO) e MXenes, estas alternativas reduzem o consumo de recursos a uma fração de 1/14, as emissões de gases de efeito estufa a 1/9 e os custos de produção a 1/13, sem comprometer a eficiência na geração de energia osmótica (Tang et al., 2024).

A integração da celulose nas arquiteturas 2D tem sido uma das estratégias de aprimoramento de maior sucesso para conciliar desempenho e baixo custo. A montagem de compósitos de GO com nanofibras de celulose (CNF) atua simultaneamente no alargamento dos nanocanais e na introdução de cargas espaciais intra-lamelares. Esta arquitetura reduz significativamente a barreira de energia para o transporte iônico e suprime a resistência interna, permitindo a extração de elevadas densidades de potência que ultrapassam os padrões críticos de viabilidade comercial, especialmente sob processos de ativação térmica e solvente (Wu et al., 2020).

Apesar do excelente desempenho de transporte, o empilhamento simples de nanofolhas 2D frequentemente resulta numa baixa resistência mecânica e instabilidade de volume (inchaço) em meio aquoso. Para resolver este problema estrutural sem sacrificar o fluxo iônico, a intercalação de nanocristais de celulose (CNC) funcionalizados com cargas opostas nas lamelas de GO demonstrou ser altamente eficaz. A inserção destas estruturas em formato de bastonetes rígidos atua como reforço mecânico da membrana, prevenindo a desintegração física, ao mesmo tempo em que a elevada densidade de cargas introduzida minimiza a barreira de energia transmembrana e garante uma operação contínua e robusta sob gradientes de salinidade severos (Zhao et al., 2022).

Numa perspectiva de minimização extrema de custos de produção, a utilização de biofilmes de celulose bacteriana apresenta-se como uma alternativa altamente viável e escalável para sistemas de RED. Através da funcionalização química superficial e de processos de estiramento a úmido (*wet-drawing*), biofilmes densificados com nanocanais alinhados e

cargas opostas podem ser produzidos em massa. Estas membranas ecológicas promovem uma elevada seletividade iônica e transmissibilidade contínua, confirmando o grande potencial da celulose não apenas como reforço, mas como matriz primária ativa para a fabricação de geradores osmóticos eficientes a um custo marginal (Wu et al., 2021).

A análise comparativa entre as matrizes sintéticas isoladas e as novas arquiteturas híbridas e naturais revela que a sustentabilidade não impõe, obrigatoriamente, um sacrifício na eficiência de conversão. Pelo contrário, a intercalação de derivados de celulose resolve falhas estruturais inerentes aos materiais bidimensionais puros. Enquanto filmes isolados de GO sofrem com baixa resistência à tração e MXenes puros demandam sínteses químicas tóxicas e onerosas (Tang et al., 2024), a adição de nanocristais (CNC) ou nanofibras (CNF) atua como um reforço físico análogo ao de compósitos estruturais, elevando a resistência mecânica em até seis vezes (Zhao et al., 2022). Além disso, essas alternativas reduzem drasticamente as barreiras de energia para o transporte de íons (Wu et al., 2020). A Tabela 2 sintetiza essa relação de custo-benefício, evidenciando como a transição para plataformas total ou parcialmente naturais proporciona cortes drásticos em emissões e custos de produção (LCA), mantendo ou até superando a densidade de potência necessária para a viabilidade comercial.

Tabela 2. Comparativo de custo-benefício, propriedades mecânicas e viabilidade (LCA) entre membranas sintéticas isoladas e alternativas sustentáveis na Eletrodialise Reversa (RED).

Material / Composição	Categoria	Potência Máxima (PD_{max})	Resistência Mecânica	Impacto Ambiental e Custo (LCA)
GO Puro	Sintético 2D	~1,8 W/m ²	Baixa (~47 MPa)	Elevado uso de reagentes corrosivos; Alto custo
MMT + CNF	100% Natural	8,61 W/m ²	Alta (~115 MPa)	Custos reduzidos a 1/13; Emissões (GEE) reduzidas a 1/9

Material / Composição	Categoria	Potência Máxima (PD_{max})	Resistência Mecânica	Impacto Ambiental e Custo (LCA)
GO + CNC	Híbrido 2D/1D	4,73 W/m ²	Extrema (272 a 309 MPa)	Barreira de energia reduzida de 38,8 para 26,8 kJ/mol
GO + CNF	Híbrido 2D/1D	4,19 W/m ²	Moderada / Alta	Barreira de energia reduzida para 6,58 kJ/mol
Celulose Bacteriana	Biológica	0,23 W/m ²	Moderada (Biofilme alinhado)	Custo marginal; Produção biossintética 100% verde

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Tang et al. (2024); Wu, Y. et al. (2020); Zhao et al. (2022); Wu, Z. et al. (2021).

3. Aprimoramentos Físicos e Desafios Operacionais

O projeto de membranas nanofluídicas exige a otimização rigorosa de parâmetros físicos para maximizar a conversão de energia. Diretrizes recentes estabelecem que o ajuste do tamanho do poro deve equilibrar perfeitamente a seletividade iônica e a permeabilidade, enquanto a espessura da membrana não segue estritamente a premissa de "quanto mais fina, melhor", exigindo uma dimensão ideal para evitar uma severa CP. Adicionalmente, a indução do efeito de diodo iônico através de assimetrias geométricas ou de carga permite um transporte retificado, amplificando a corrente em uma direção preferencial e suprimindo gargalos de difusão (Chu et al., 2023).

Para transcender os limites das otimizações puramente estruturais, a aplicação de campos físicos externos tem despontado como um método avançado para induzir e amplificar o fluxo iônico, destacando-se o aproveitamento de gradientes térmicos acoplados (Xin et al., 2021). Aproveitando a excelente capacidade de conversão fototérmica dos MXenes, a irradiação luminosa assimétrica sobre essas membranas gera um gradiente de temperatura local intenso (Liu et al., 2020). Esse calor induzido

pela luz atua como uma força motriz secundária que dispara o transporte iônico ativo da região de menor para a de maior temperatura, o que, quando somado ao gradiente de concentração, chega a dobrar a densidade de potência elétrica gerada no sistema (Liu et al., 2020).

Apesar dos notáveis avanços em escala laboratorial, a transição dessas tecnologias para as condições de operação reais enfrenta desafios substanciais ditados pela composição complexa das águas naturais. Em misturas autênticas de água doce e oceânica, a presença abundante de íons multivalentes (como o Mg^{2+}) induz o fenômeno limitante de transporte contra-gradiente, ou *uphill transport* (Moreno et al., 2018). Neste cenário termodinâmico, os íons multivalentes movem-se na direção oposta ao gradiente principal de salinidade para equilibrar as forças eletromotrizes geradas pelo fluxo massivo de íons monovalentes (Moreno et al., 2018). Esse transporte parasita neutraliza a tensão de circuito aberto e eleva drasticamente a resistência interna da membrana devido à menor mobilidade do magnésio, resultando em perdas severas na densidade de potência e impondo a necessidade de desenvolver membranas com arquiteturas abertas para acomodar íons multivalentes ou com triagem seletiva para bloqueá-los (Moreno et al., 2018).

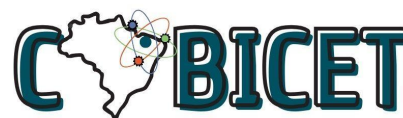
CONCLUSÃO

A transição da geração de energia osmótica para a nanoescala demonstrou que o design racional de canais nanométricos e subnanométricos é capaz de superar as limitações da termodinâmica clássica que restringiam os sistemas macroscópicos tradicionais. O controle preciso sobre a arquitetura de materiais bidimensionais e a modulação da dupla camada elétrica permitiram um transporte iônico com seletividade e permeabilidade sem precedentes, validando teoricamente e em laboratório o vasto potencial da energia azul.

Contudo, para que esta autêntica "hidrelétrica invisível" transcenda o ambiente acadêmico e alcance a comercialização, é imperativa a transição para estudos em escala piloto. O desenvolvimento futuro deve focar-se na resolução de desafios operacionais práticos, especialmente a fabricação de membranas em larga escala com estabilidade mecânica a longo prazo, a mitigação da polarização de concentração em arranjos de alta densidade e a gestão do transporte contra-gradiente induzido por íons multivalentes em águas naturais. A superação desses gargalos de engenharia ditará a consolidação desta tecnologia como uma matriz energética limpa, contínua e verdadeiramente sustentável.

REFERÊNCIAS

- Cao, L., Wen, Q., Feng, Y., Ji, D., e Et., A. On the Origin of Ion Selectivity in Ultrathin Nanopores: Insights for Membrane-Scale Osmotic Energy Conversion. *Advanced Functional Materials*, 2018. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804189>
- Chu, C.-W., Fauziah, A. R., e Yeh, L.-H. Optimizing Membranes for Osmotic Power Generation. *Angewandte Chemie*, 135, e202303582, 2023. <https://doi.org/10.1002/ange.202303582>
- Ding, L., Xiao, D., Lu, Z., Deng, J., e Et., A. Oppositely Charged Ti₃C₂T_x MXene Membranes with 2D Nanofluidic Channels for Osmotic Energy Harvesting. *Angewandte Chemie*, 2020. <https://doi.org/10.1002/ange.201915993>
- DuChanois, R. M., Porter, C. J., Violet, C., Verduzco, R., e Et., A. Membrane Materials for Selective Ion Separations at the Water–Energy Nexus. *Advanced Materials*, 2021. <https://doi.org/10.1002/adma.202101312>
- Hong, S., Ming, F., Shi, Y., Li, R., e Et., A. Two-Dimensional Ti₃C₂T_x MXene Membranes as Nanofluidic Osmotic Power Generators. *ACS Nano*, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02579>
- Kim, D.-K., Duan, C., Chen, Y.-F., e Majumdar, A. Power generation from concentration gradient by reverse electrodialysis in ion-selective nanochannels. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10404-010-0641-0>
- Kim, J., Jeong, K., Park, M. J., Shon, H. K., e Kim, J. H. Recent Advances in Osmotic Energy Generation via Pressure-Retarded Osmosis (PRO): A Review. *Energies*, 8, 11821–11845, 2015. <https://doi.org/10.3390/en81011821>
- Laucirica, G., Toimil-Molares, M. E., Trautmann, C., Marmisollé, W., e Et., A. Nanofluidic osmotic power generators – advanced nanoporous membranes and nanochannels for blue energy harvesting. *Chemical Science*, 2021. <https://doi.org/10.1039/D1SC03581A>
- Lin, X., Liu, P., Xin, W., Teng, Y., e Et., A. Heterogeneous MXene/PS-b-P2VP Nanofluidic Membranes with Controllable Ion Transport for Osmotic Energy Conversion. *Advanced Functional Materials*, 2021. <https://doi.org/10.1002/adfm.202105013>
- Liu, P., Zhou, T., Teng, Y., Fu, L., Hu, Y., Lin, X., Kong, X.-Y., Jiang, L., e Wen, L. Light-Induced Heat Driving Active Ion Transport Based on 2D MXene Nanofluids for Enhancing Osmotic Energy Conversion. *CCS Chemistry*, 3, 1325–1335, 2020. <https://doi.org/10.31635/ccschem.020.202000296>
- Moreno, J., Díez, V., Saakes, M., e Nijmeijer, K. Mitigation of the effects of multivalent ion transport in reverse electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.069>
- Pakulski, D., Czepa, W., Buffa, S. D., Ciesielski, A., e Et., A. Atom-Thick Membranes for Water Purification and Blue Energy Harvesting. *Advanced Functional Materials*, 2019. <https://doi.org/10.1002/adfm.201902394>
- Rastgar, M., Moradi, K., Burroughs, C., Hemmati, A., Hoek, E., e Sadrzadeh, M. Harvesting Blue Energy Based on Salinity and Temperature Gradient: Challenges, Solutions, and Opportunities. *Chemical Reviews*, 123, 10156–10205, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00168>
- Tang, J., Wang, Y., Yang, H., Zhang, Q., Wang, C., Li, L., Zheng, Z., Jin, Y., Wang, H., Gu, Y., e Zuo, T. All-natural 2D nanofluidics as highly-efficient osmotic energy generators. *Nature Communications*, 15, 3649, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47915-z>
- Tong, X., Liu, S., Crittenden, J., e Chen, Y. Nanofluidic Membranes to Address the Challenges of Salinity Gradient Power Harvesting. *ACS Nano*, 2021. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09513>
- Veerman, J., de Jong, R. M., Saakes, M., Metz, S. J., e Et., A. Reverse electrodialysis: Comparison of six commercial membrane pairs on the thermodynamic efficiency and power density. *Journal of Membrane Science*, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.05.047>
- Wang, P., Tao, W., Zhou, T., Wang, J., Zhao, C., Zhou, G., e Yamauchi, Y. Nanoarchitectonics in Advanced Membranes for Enhanced Osmotic Energy Harvesting. *Advanced Materials*, 36, 2404418, 2024. <https://doi.org/10.1002/adma.202404418>
- Wu, Y., Xin, W., Kong, X.-Y., Chen, J., e Et., A. Enhanced ion transport by graphene oxide/cellulose nanofibers assembled membranes for high-performance osmotic energy harvesting. *Materials Horizons*, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0MH00979B>
- Wu, Z., Ji, P., Wang, B., Sheng, N., e Et., A. Oppositely charged aligned bacterial cellulose biofilm with nanofluidic channels for osmotic energy



harvesting. *Nano Energy*, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105554>

Xin, W., Jiang, L., e Wen, L. Two-Dimensional Nanofluidic Membranes toward Harvesting Salinity Gradient Power. *Accounts of Chemical Research*, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00431>

Yip, N. Y., Vermaas, D. A., Nijmeijer, K., e Elimelech, M. Thermodynamic, Energy Efficiency, and Power Density Analysis of Reverse Electrodialysis Power Generation with Natural Salinity Gradients. *Environmental Science & Technology*, 2014. <https://doi.org/10.1021/es5005413>

Zhang, Z., Wen, L., e Jiang, L. Nanofluidics for osmotic energy conversion. *Nature Reviews Materials*, 2021.
<https://doi.org/10.1038/s41578-021-00300-4>

Zhao, W., Wang, Y., Han, M., Xu, J., Han, L., e Tam, K. C. Osmotic energy generation with mechanically robust and oppositely charged cellulose nanocrystal intercalating GO membranes. *Nano Energy*, 98, 107291, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107291>

Zhou, J., Hao, J., Wu, R., Su, L., Wang, J., Qiu, M., Bao, B., Ning, C., Teng, C., Zhou, Y., e Jiang, L. Maximizing Ion Permselectivity in MXene/MOF Nanofluidic Membranes for High-Efficient Blue Energy Generation. *Advanced Functional Materials*, 32, 2209767, 2022.
<https://doi.org/10.1002/adfm.202209767>