

Geradores de energia por evaporação de água

Patrícia Soares^{1,2,3}, João Ventura^{2,3}, Joana Oliveira^{1,4}

¹ Departamento de Engenharia Física, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 4200-465, Portugal

² Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 4169-007, Portugal

³ Instituto de Física dos Materiais da Universidade do Porto, Porto, 4169-007, Portugal

⁴ Associate Laboratory for Energy, Transport and Aerospace (LAETA), INEGI, Porto, 4200-465, Portugal

up201805381@up.pt

1. Resumo

A necessidade de obter energia de forma sustentável tem vindo a aumentar nas últimas décadas, o que tem impulsionado o aparecimento de novas tecnologias de geração e recolha de energia. Dispositivos que utilizam evaporação da água como motor para a geração de energia, permitem obter uma diferença de potencial constante aproveitando um fenómeno natural recorrente, sem ser necessário exercer trabalho externo adicional. Entre os principais desafios desta tecnologia emergente está a análise dos possíveis mecanismos que lhe estão associados e os diferentes materiais e fatores que influenciam o desempenho destes dispositivos.

2. Introdução

Na última década a preocupação com o estado do planeta tem aumentado devido à escassez de recursos e desafios ambientais. Isto resultou na necessidade de explorar alternativas a métodos tradicionais de extração e gestão de recursos. Destes recursos, a energia é omnipresente no nosso quotidiano, desempenhando um papel vital na nossa vida diária e apoiando o crescimento económico. No entanto, cerca de 80 % da sua origem provém de combustíveis fósseis [1], que são a antítese da nossa preocupação ambiental, pelo que é crucial encontrar novos métodos de geração de energia que sejam sustentáveis.

A água, cobrindo 71 % da superfície do planeta, para além de ser um elemento fundamental para a vida humana, representa o maior portador de energia, absorvendo aproximadamente 35 % da energia solar recebida pela Terra. A possibilidade de extrair energia desta fonte basilar tem atraído elevado investimento e investigação, promovendo o desenvolvimento de vários métodos, tanto para centrais hidroelétricas tradicionais como em áreas mais emergentes, como o caso da tecnologia hidrovoltáica [2].

Distinta dos métodos convencionais de recolha de energia a partir de energia cinética, a tecnologia hidrovoltáica per-

mite a geração de energia elétrica através da interação de um material com a água [3]. Esta abordagem engloba diferentes mecanismos com origem comum no movimento da água e inclui a geração de energia induzida por evaporação. Notavelmente, se 1 % da energia que a água absorve fosse aproveitada com 1 % de eficiência seria possível fornecer cerca de 1/3 do consumo global de energia [4].

A evaporação de água é um processo contínuo que acontece à nossa volta devido à transformação de energia térmica em energia latente, e foi apenas há 6 anos que se descobriu um método para se aproveitar diretamente este processo natural. Em 2017, Xue e a sua equipa [5], foram capazes de gerar uma diferença de potencial superior a 1 V e uma corrente elétrica de cerca de 150 nA, usando apenas uma fina camada (filme) de carbono, a temperatura e pressão ambiente, durante cerca de 8 dias. Esta descoberta despertou um elevado interesse nesta área levando a um aumento da investigação e desenvolvimento com diferentes materiais e estruturas, de modo a melhorar o desempenho deste tipo de dispositivos e os tornar viáveis para geração de energia a uma escala elevada.

3. Mecanismo de geração de energia

Tendo em conta as propriedades do vapor de água, podemos usá-lo para extrair energia de vários tipos, tais como química, térmica ou mecânica [6]. A tecnologia hidrovoltáica tem como principal origem a interação entre a água e o material do dispositivo, em particular o acoplamento na interface [7].

Sendo uma tecnologia recente ainda existe alguma discussão sobre qual a conjugação de diferentes mecanismos associados à geração desta diferença de potencial em cada dispositivo específico, sendo que se destacam dois conceitos:

- Formação de dupla camada elétrica (EDL): quando um líquido entra em contacto com um sólido, este tem tendência a gerar uma EDL de modo a diminuir a energia

superficial. Desta forma, alguns iões são adsorvidos pela fase sólida devido à ação da carga ou potencial químico nesta (formando a camada de Stern). Consequentemente, cargas de sinal oposto são atraídas por esta camada devido às forças de Coulomb (camada de difusão), de modo a manter o fluido neutralizado [7];

- Grupos funcionais: são agregados característicos de átomos que formam ligações moleculares com propriedades físicas e químicas específicas. No caso de materiais carbonáceos são referidos os grupos: ácido carboxílico, carbonilo e hidroxilo, que proporcionam uma carga não-nula na superfície do material quando são ionizados, auxiliando a formação da EDL [8].

Um dos modelos mais discutidos é o “*streaming potential*”, um efeito eletrocinético clássico que é baseado na associação de uma diferença de pressão ao movimento dos iões da camada de difusão (*streaming current*). Se o tamanho capilar for comparável ao comprimento de Debye, há sobreposição das EDLs das paredes do canal, o que consecutivamente origina o transporte de mais iões com carga oposta à das paredes do canal. Desta forma é gerada uma diferença de concentração iónica que se traduz numa diferença de potencial [7]. Associado a este efeito de migração de iões na solução está associado o efeito de “*pseudostreaming*”, que considera uma camada tripla, encontrando-se a terceira camada no condutor, onde existem eletrões que traduzem uma imagem espelhada às cargas da camada de Stern, fluindo assim na direção oposta à *streaming current* [9].

Nestes dois casos, a recolha de energia depende do elétrodo usado. No caso da “*streaming current*”, geralmente utilizam-se elétrodos reversíveis (como Ag/AgCl), que permitem a conversão de corrente iónica em corrente elétrica a partir de reações redox [7]. Para a captação de eletrões no material condutor, utilizam-se elétrodos condutivos inertes, como nanotubos de carbono ou metais condutores (como ouro ou platina) [4].

Para além destes dois mecanismos principais, existem outros associados à recolha de energia por evaporação como “*electron drag*”, onde os eletrões se movem no condutor por interagirem com o campo elétrico dos iões do líquido em movimento [10,11].

De modo geral, o fator mais importante para a fabricação de energia usando estes diferentes mecanismos é a presença de uma assimetria de carga, que pode ser gerada a partir de apenas uma zona em contacto com a água, que pode ser implementada de várias formas, como colocando uma gota de água apenas numa das extremidades (figura 1a), mergulhando um parte do dispositivo em água (figura 1b), ou, complementar a esta assimetria imposta pela diferença de concentração de água, impondo um gradiente de material que força uma melhor adsorção de iões de um lado comparativamente ao outro (figura 1c).

4. A estrutura mais simples e utilização de desperdício biológico

A estrutura mais simples e mais investigada consiste num material poroso, condutor ou isolador, entre dois elétrodos, que pode apresentar diferentes tipos de materiais, configurações e em casos mais complexos, diferentes camadas.

O material poroso requer quatro características principais que

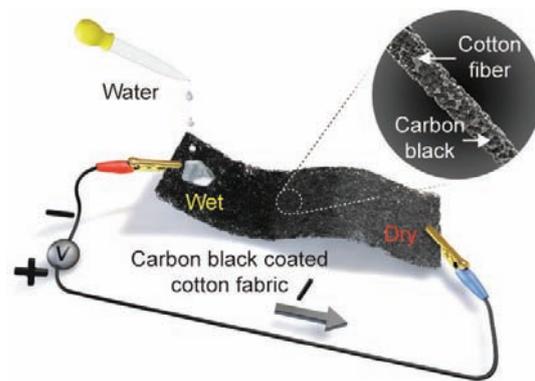


Figura 1a - Ilustração esquemática do método de operação de um dispositivo composto por um tecido de algodão revestido com carbono super P, criando assimetria usando uma gota numa extremidade [12].

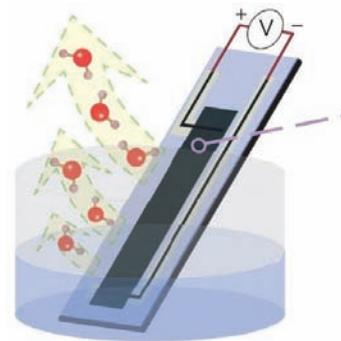


Figura 1b - Ilustração esquemática do método de operação de um dispositivo composto por um filme fino de carbono, onde se cria assimetria colocando uma das regiões debaixo de água [5].

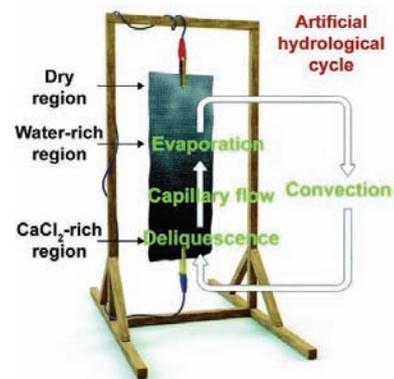


Figura 1c - Ilustração esquemática do método de operação tecido de algodão revestido com carbono super P, criando assimetria usando uma gota com CaCl_2 numa extremidade [13].

devemos ter em conta: para maximizar o desempenho do transporte de iões é necessário que os nanocanais sejam hidrofílicos; de modo a facilitar a formação da dupla camada importa que a superfície do material tenha alta densidade de carga e potencial zeta (potencial elétrico no plano que separa fluido móvel do adsorvido); para evitar a neutralização total das cargas à superfície, os poros devem ter um comprimento comparável ao comprimento de Debye (espessura da EDL) [7]; e por fim, importa que este material seja poroso de modo a que a área de superfície específica seja maior e consequentemente os locais de adsorção, de modo a aumentar o efeito da dupla camada. Zheng e a sua equipa [7] identificaram os materiais mais adequados para este tipo de tecnologia: carbono, devido às suas propriedades condutoras e estáveis, materiais com base em

biomassa devido às suas propriedades biodegradáveis o que os torna promissores para a economia circular; óxidos metálicos; compósitos, que procuram obter as melhores qualidades dos outros materiais, mas requerem uma tecnologia de preparação mais complexa; arranjos de nano-fios, entre outros materiais.

Destes materiais o mais frequentemente usado é o carbono, de origem ou não biológica, apresentado como possuindo elevadas condutividade elétrica, área superficial, elevada adsorção química, versatilidade, baixo custo e impacto ambiental, e facilidade de utilização. Um ponto muito importante aquando da utilização destes materiais é o processo de modificação da sua superfície, que pode ser química ou física, e que permite a formação de diferentes grupos funcionais. Para além dos grupos funcionais pode ainda aumentar-se a carga da superfície adicionando carga iónica ao material [8].

De modo a maximizar o carácter sustentável destes dispositivos, os materiais com base em biomassa são de grande interesse. Compostos por carbono, oxigénio e hidrogénio, estes permitem-nos obter carbono de modo sustentável e reaproveitar desperdícios alimentares contribuindo para uma economia circular [7].

5. Influência das condições ambientais

Para além das características do material, também as condições ambientais têm influência na performance destes dispositivos. Como se baseiam na evaporação contínua de água, fatores ambientais como temperatura, humidade, velocidade do vento e concentração solar têm ação na geração de energia, uma vez que influenciam a taxa de evaporação. Um aumento de temperatura e concentração solar, promovem a evaporação da água e, em certos dispositivos, a geração de cargas devido à transferência de energia térmica aos grupos funcionais e consequente dissociação. A velocidade do vento também favorece a evaporação, renovando o ar adjacente ao dispositivo. Por fim é de notar que a evaporação depende da diferença de pressão entre o ar e o líquido, sendo que a elevadas humidades a diferença de pressão é menor e consequentemente há uma diminuição da taxa de evaporação [14]. No caso de um material ser muito hidrofílico, a influência das condições ambientais nos valores de tensão gerados é mais reduzida, no entanto nota-se que maiores taxas de evaporação estão associadas a menores tempos de geração de energia [12]. Noutros casos, a diminuição da taxa de evaporação traduz-se numa diminuição da diferença de potencial por reprimir o efeito eletrocínético através da redução do transporte de cargas [5].

Para além dos fatores ambientais, tanto a geometria do dispositivo como o material usado nos eletrodos, assim como as propriedades do líquido, têm impacto no valor final medido, sendo assim parâmetros a ter em conta nestes dispositivos [14].

6. Outras aplicações

Por enquanto, estes dispositivos ainda não têm capacidade de gerar potenciais elevados. No entanto, o seu estudo já permite a sua utilização em duas grandes áreas: no apoio à dessalinização da água [15] e no campo dos sensores e "internet das coisas", graças à sua resposta em diferença de potencial a diferentes humidades, temperatura, luz ambiente e à presença de líquido, tornando-os bom sensores,

por exemplo de fugas de água [16] ou simplesmente no reconhecimento de variações destes parâmetros [17].

7. Geração de energia com resíduos biológicos

Temo-nos concentrado no estudo de novos resíduos biológicos para produzir carbono ativado a ser utilizados neste tipo de dispositivos de modo a ter alternativas sustentáveis e de baixo impacto. Neste contexto produzimos membranas porosas de carbono a partir da submersão de um material fibroso de algodão numa tinta preparada a partir de carbono com baixa pegada ambiental. Estudamos dois resíduos biológicos de diferentes origens: um cuja produção é cerca de 4,7 milhões de toneladas por ano em que a maior parte não é aproveitada, e outro cuja produção se espera que aumente até 90 milhões de toneladas em 2030 e que é considerado um resíduo perigoso de acordo com as regulações da União Europeia. Por terem origens diferentes foram também submetidos a processos de carbonização diferentes, antes de serem incorporados na bio-tinta.

No caso do primeiro resíduo, este foi submetido a um processo de 7 dias durante o qual sofreu processos de carbonização, moagem e ativação química da superfície utilizando hidróxido de potássio (KOH). Na mesma linha, o segundo resíduo, sofreu um processo mais curto, com utilização de menos recursos e com ativação química utilizando hidróxido de sódio (NaOH). Após estes processos, cada carbono ativado foi misturado com carbono Super P, para aumentar a condutividade elétrica e capacidade de absorção de radiação, e um surfactante (Dodecilbenzeno Sulfonato de Sódio), para auxiliar a dissolução do carbono e diminuir a tensão superficial quando a membrana está em contacto com a água, originando assim as tintas de carbono a testar.

Após a impregnação desta tinta na membrana fibrosa, é possível obter uma membrana de elevada porosidade (grande área de superfície específica), hidrofílica e com alta densidade de carga superficial. Comparando as membranas dos diferentes resíduos, com outra com apenas carbono Super P, é considerável o aumento da potência gerada e o tempo durante o qual esta se mantém constante (figura 2).

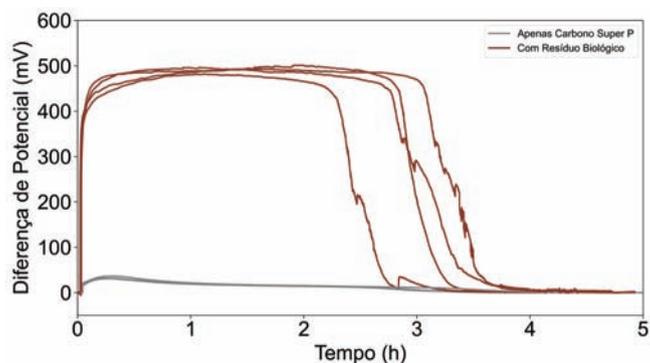


Figura 2 - Comparação do comportamento da diferença de potencial gerada ao longo do tempo utilizando ou não um resíduo biológico.

8. Notas finais

De modo geral, a eficiência dos dispositivos de geração de energia através da evaporação da água ainda se encontra aquém do pretendido para ser utilizada como fonte quotidiana de energia, estando ainda longe dos valores das mé-

tricas obtidas com outros tipos de geradores. No entanto, considerando que é um dispositivo recente que se baseia num fenómeno natural abundante e constante e que não depende tão severamente de condições ambientais, como é o caso das diferentes energias renováveis, é fundamental continuar o desafio do seu desenvolvimento. Além deste ponto, dado que pode ser fabricado com materiais provenientes de desperdício biológicos, o nível de sustentabilidade atingido é superior a outros mecanismos de recolha de energia.

Referências

- [1] Ritchie, H., Roser, M., Rosado, P. Energy 2022. *Our World in Data*.
- [2] Zhang, Z., Li, X., et al. *Emerging hydrovoltaic technology*, *Nature Nanotechnology*, Vol. 13 (2018)
- [3] Stephens, G. L., et al. *An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations*, *Nature Geoscience*, Vol. 5 (2020)
- [4] Yin, J., et al. *Hydrovoltaic energy on the way*, *Joule*, Vol. 4 (2020).
- [5] Xue, G., et al. *Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials*. *Nature Nanotechnology*, Vol. 12 (2017).
- [6] Huang, Y., Cheng, H., Qu, L. *Emerging Materials for Water-Enabled Electricity Generation*. *ACS Materials Letters*, Vol. 3 (2021).
- [7] Zheng, C., Chu, W., Fang, S., Tan, J., Wang, X., Guo, W. *Materials for evaporation-driven hydrovoltaic technology*, *Interdisciplinary Materials*, Vol. 1, No. 4, Wiley (2022).
- [8] Li, J., Liu, et al., *Surface functional modification boosts the output of an evaporation-driven water flow nanogenerator*, *Nano Energy*, Vol. 58 (2019).
- [9] Zhang H, Zhang Z, Guo W. *Mechanistic insight into electricity generation from moving ionic droplets on graphene*. *Sci China Mater* (2021).
- [10] Kárl, P. & Shapiro, M. *Nanotube electron drags in flowing liquids*. *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001).
- [11] Ghosh, S.; Sood, et al. Flow-induced voltage and current generation in carbon nanotubes. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* (2004).
- [12] Yun, T, *Transpiration Driven Electrokinetic Power Generator*, *ACS Nano*, vol 13 (2019).
- [13] Bae, J, *Self-operating transpiration-driven electrokinetic power generator with an artificial hydrological cycle*, *Energy & Environmental Science*, Vol. 13 (2020).
- [14] Jiao, S. et al. *Emerging hydrovoltaic technology based on carbon black and porous carbon materials: A mini review*, *Carbon*, Vol. 193 (2022).
- [15] Liu, J. , et al. , *Self-regulating and asymmetric evaporator for efficient solar water-electricity generation*, *Nano Energy*, Vol. 86 (2021).
- [16] Hui, Z. et al. , *A Self-Powered Nanogenerator for the Electrical Protection of Integrated Circuits from Trace Amounts of Liquid*. *Nano-Micro Lett.* 12, 5 (2020).
- [17] Ji, B., et al. , *Intelligent multiple-liquid evaporation power generation platform using distinctive Jaboticaba-like carbon nanosphere@TiO₂ nanowires*, *J. Mater. Chem. A*, Vol. 7 (2019).



Patrícia Soares, completou a licenciatura em Engenharia Física da Universidade do Porto em 2021, tendo ingressado logo no mestrado também de Engenharia Física, seguindo uma vertente relacionada com materiais e estatística. Devido ao seu fascínio por sustentabilidade, energia e materiais, começou a sua tese de mestrado em captação de energia através da evaporação da água, utilizando materiais de baixo impacto.



João Ventura, obteve o seu doutoramento em Física pela Universidade do Porto (UP) em 2006. É atualmente Investigador Principal na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Vice-Diretor do CEMUP-MNTEC e Vice-Presidente do IFIMUP. Os seus interesses de investigação incluem nanomateriais para recolha de energia, nanogeradores triboelétricos e nanoeletrónica neuromórfica. É autor de mais de 190 publicações científicas.



Joana Oliveira, é doutorada em Física, pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Professora Associada do Departamento de Engenharia Física da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e investigadora do INEGI-LAETA-Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica. Entre os principais interesses de investigação encontram-se baterias de estado sólido, baterias de água do mar, nano-geradores e bio resíduos para recolha e armazenamento de energia.