

Nanogeradores triboelétricos

Carlos Callaty¹, Cátia Rodrigues¹, André Pereira¹, João Ventura¹

¹ Instituto de Física dos Materiais Avançados, Nanotecnologia e Fotónica (IFIMUP), Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal

joventur@fc.up.pt

Resumo

Devido ao aquecimento global e à atual crise energética, o mundo enfrenta o desafio de encontrar novas fontes de energia limpa e renovável que conduzam à redução das emissões de dióxido de carbono. Das fontes de energia atualmente em investigação, os nanogeradores triboelétricos são transdutores que convertem, com grande eficiência, energia mecânica em energia elétrica para, entre outros, alimentar dispositivos da *Internet* das Coisas ou recolher a energia das ondas do mar. Neste artigo será apresentada uma visão geral do funcionamento e modos de operação dos nanogeradores triboelétricos, assim como estratégias de otimização e potenciais aplicações à pequena e grande escala.

1. Introdução

Ao longo do último século, houve um aumento drástico das emissões de dióxido de carbono relacionado com o consumo excessivo de energia proveniente de combustíveis fósseis [1], [2]. Para reduzir as emissões de dióxido de carbono, mas simultaneamente suportar o aumento continuado do consumo de energia, é urgente encontrar novas tecnologias verdes que possam conduzir a um mundo neutro em carbono. Para além dos painéis fotovoltaicos e das turbinas eólicas que recolhem energia do sol e do vento respetivamente, outras fontes de energia limpa estão a ser desenvolvidas. Entre elas, os nanogeradores piezoelétricos ou triboelétricos são capazes de converter energia cinética em energia elétrica. Dada a sua novidade e aplicabilidade, este artigo focar-se-á em rever a física e aplicações por detrás dos nanogeradores triboelétricos (*triboelectric nanogenerators* ou TENGs, em inglês). Os TENGs funcionam utilizando uma combinação do efeito triboelétrico - um efeito semelhante ao dos "choques eletrostáticos" - e da indução eletrostática para gerar energia elétrica. O efeito triboelétrico é conhecido há milhares de anos e consiste na formação de cargas eletrostáticas quando dois materiais isoladores elétricos são friccionados ou entram em contacto [3]. Isto ocorre porque no processo de contacto/fricção os materiais equilibram o seu potencial eletroquímico e, quando afastados, o equilíbrio é quebrado e os mesmos

tendem para a neutralidade de carga. No entanto, como são isoladores, estes materiais retêm as cargas transferidas durante muito tempo (desde horas até meses), deixando por isso um material carregado positivamente e outro negativamente [3]. Até recentemente este efeito era indesejado. Por exemplo, a fricção do ar em aviões causa a acumulação de cargas eletrostáticas, interferindo com as comunicações das aeronaves [3]. No entanto, em 2012, o grupo de Z. L. Wang desenvolveu o primeiro TENG capaz de converter energia mecânica aleatória em potência elétrica [4]. Desde então, vários estudos têm vindo a ser desenvolvidos para otimizar o desempenho dos TENGs através do melhoramento dos materiais triboelétricos ou do seu modo de funcionamento, tendo já sido demonstrada a utilidade dos TENGs num grande número de aplicações.

2. Modos de funcionamento

Existem quatro modos de funcionamento para os TENGs: contacto-separação [5], deslizamento [6], eletrodo único [7] e camada de movimento livre [6]. Os modos fundamentais são os de contacto-separação e deslizamento, enquanto que os outros dois podem ser explicados baseados nos primeiros. Os TENGs, nos modos fundamentais, são compostos por dois eletrodos e um ou dois materiais dielétricos, dependendo se o contacto for realizado entre um material dielétrico e um metal ou entre dois materiais dielétricos. Inicialmente os eletrodos e materiais triboelétricos estão neutros em termos de carga e em equilíbrio [Figura 1(a)] [8]. Ao haver contacto e separação ou fricção entre materiais (no modo de deslizamento), os materiais triboelétricos transferem carga entre eles, ficando a superfície dos materiais carregadas, uma positiva e a outra negativamente [Figura 1(b)] [8]. Nesta altura, entra-se num ciclo em que existem dois equilíbrios.

Focando-nos no modo contacto-separação, um dos equilíbrios ocorre quando os materiais triboelétricos entram em contacto, uma vez que as cargas opostas na superfície de cada um se cancelam, resultando numa carga global nula, forçando os eletrodos a também se neutralizarem em termos de carga [Figura 1(b)] [8]. O ou-

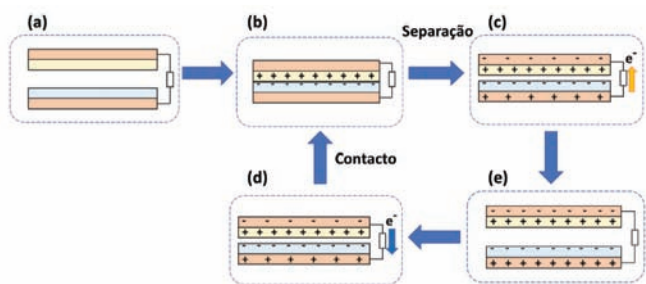


Figura 1 - Ciclo de funcionamento do TENG de contacto-separação.

tro equilíbrio ocorre quando ambos os pares eléctros/materiais triboelétricos estão afastados entre si e as cargas dos materiais triboelétricos induzem cargas opostas nos eléctros em contacto [Figura 1(e)] [8]. Entre estes dois estados, electrões circulam entre os eléctros para passar dum equilíbrio para o outro ciclicamente [Figura 1(c),(d)]. Esta movimentação de electrões, quando os materiais se aproximam, produz picos de contacto e quando se afastam produz picos de separação (Figura 2).

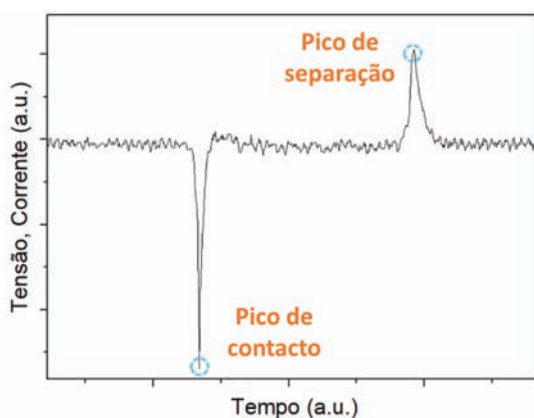


Figura 2 - Exemplo de picos de contacto e separação de tensão ou corrente eléctrica num dado tempo para o TENG de contacto-separação.

O modelo de Niu et al. [5] caracterizou o TENG de contacto-separação como um condensador de placas paralelas, assumindo que a área do TENG é muito superior à distância entre eléctros. Assim é possível obter o campo eléctrico em ambos os materiais triboelétricos e no espaço de ar entre materiais, obtendo-se a relação V-Q-x que governa a energia gerada pelo TENG:

$$V = -\frac{Q}{A\epsilon_0} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

onde Q é a carga nos eléctros, A é a área do TENG, σ é a densidade de superfície de carga, d_1 e d_2 são as espessuras dos materiais triboelétricos e ϵ_{r1} e ϵ_{r2} as respectivas permitividades relativas. O parâmetro $x(t)$ é a distância (variável com o tempo) entre materiais triboelétricos.

3. Materiais: tendências de carga e métodos para os modificar

Existe uma vasta gama de materiais triboelétricos que podem ser organizados de acordo com a sua tendência para carregar mais positiva ou negativamente (Figura 3). Para maximizar o efeito triboelétrico, o ideal é ter dois materiais com forte tendência de carga oposta, maximizando a diferença de carga entre superfícies. O nylon e a sílica são exemplos de materiais de forte tendência positiva, enquanto o polidimetilsiloxano (PDMS) e o politetrafluoretileno (PTFE) são materiais com forte tendência negativa (Figura 3). O PDMS é um material muito atrativo apesar de não ter uma tendência tão negativa como o PTFE porque não é tóxico, é fácil de fazer, barato e é fácil de melhorar o seu desempenho devido à facilidade em implementar padrões na superfície para aumentar a superfície de contacto [9]–[11]. Também é possível misturar nanopartículas no processo de fabrico do PDMS para aumentar a capacidade de reter carga (aumentando a permitividade relativa do compósito) e desta forma aumentar o desempenho do TENG [11]. Contudo, é sempre necessário otimizar a concentração de nanopartículas utilizada, uma vez que o seu excesso conduz à diminuição da área de contacto e do desempenho do TENG [11]. Um outro exemplo interessante é o da inclusão de poros de ar micrométricos no PDMS de forma a aumentar a sua compressibilidade e a superfície de contacto entre materiais triboelétricos. Os métodos descritos anteriormente podem ser utilizados com outros materiais e podem ser combinados para obter um melhor desempenho do TENG. De notar também que já se encontram desenvolvidos métodos numéricos que permitem otimizar as concentrações de nanopartículas, tamanhos dos poros ou padrões superficiais dos materiais, com o objetivo de economizar tempo e recursos na fabricação de TENGs [12]–[14]. A modificação e otimização dos materiais também permite desenvolver TENGs que operam em condições extremas [por exemplo, altas temperaturas (acima de 100 °C), elevada humidade ou pressão [15]–[17].

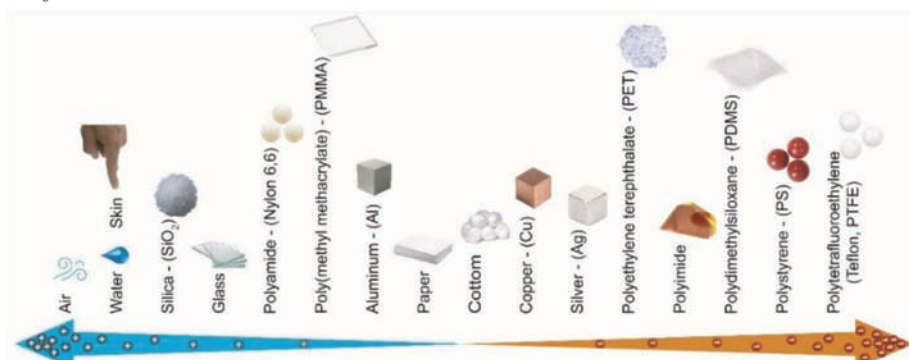


Figura 3 - Ordenamento dos materiais de acordo com as suas tendências positivas e negativas de acumulação de carga [8].

4. Aplicações: da Internet das Coisas à energia azul

Com base nos quatro modos de funcionamento, vários TENGs têm vindo a ser desenvolvidos para coletar diferentes tipos de energia para inúmeras aplicações [18], uma vez que este tipo de dispositivos constitui uma fonte de energia limpa, tem baixo custo de produção e não precisa de grande manutenção. Estes nanogeradores podem funcionar por exemplo, como fontes de energia para alimentar dispositivos eletrônicos de baixa potência [19], [20] ou como sensores auto-alimentados [21], [22].

Recentemente os nanogeradores triboelétricos têm demonstrado enorme potencial para serem incorporados em boias flutuantes no mar [8], [23]. Em vez de dependerem de painéis fotovoltaicos, cujo desempenho depende da posição do flutuador, que varia com o balançar com as ondas, e da exposição solar, os TENGs podem ser inseridos dentro do flutuador [Figura 4(a)], resistindo à corrosão do mar, e produzir energia durante o dia e a noite. Os nanogeradores triboelétricos também podem ser utilizados para monitorizar a saúde humana ao coletar energia do movimento humano, como por exemplo em sapatos [Figura 4(b)] [24], [25]. Os TENGs também podem ser hibridizados com outras tecnologias, como por exemplo com nanogeradores piezoelétricos ou eletromagnéticos, para mitigar o seu problema de gerar baixas correntes [Figura 4(b)].

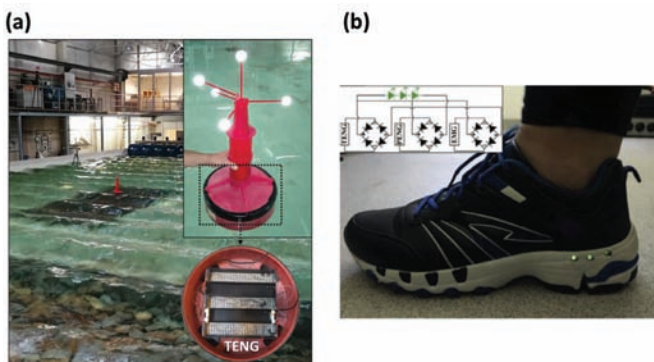


Figura 4 - (a) Teste dum TENG inserido numa boia num tanque de ondas [23]. (b) Sapato com um TENG, e nanogerador piezoelétrico-eletromagnético capaz de gerar energia com o andar do ser humano [24].

5. Conclusão

Os TENGs têm mostrado elevado potencial para aplicações na coleta de energia do mar, movimento humano e para produzir sensores auto-alimentados, com vários esforços a serem realizados para otimizar o seu desempenho e dos materiais constituintes, assim como adaptá-lo a condições adversas específicas.

Referências

- [1] M. W. Jones et al., "National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850," *Sci. data*, vol. 10, no. 1, p. 155, 2023, doi: 10.1038/s41597-023-02041-1.
- [2] T. Ahmad and D. Zhang, "A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far," *Energy Reports*, vol. 6, no. November, pp. 1973-1991, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.07.020.
- [3] C. Zhang and Z. L. Wang, S. Niu, and Y. Zi, *Triboelectric Nanogenerators, 1st ed. Springer Cham*, 2016.
- [4] F. R. Fan, Z. Q. Tian, and Z. Lin Wang, "Flexible triboelectric generator," *Nano Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 328-334, 2012, doi: 10.1016/j.nanoen.2012.01.004.
- [5] S. Niu et al., "Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 12, pp. 3576-3583, 2013, doi: 10.1039/c3ee42571a.
- [6] S. Niu and Z. L. Wang, "Theoretical systems of triboelectric nanogenerators," *Nano Energy*, vol. 14, pp. 161-192, 2014, doi: 10.1016/j.nanoen.2014.11.034.
- [7] S. Niu et al., "Theoretical investigation and structural optimization of single-electrode triboelectric nanogenerators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, no. 22, pp. 3332-3340, 2014, doi: 10.1002/adfm.201303799.
- [8] C. Rodrigues et al., "Emerging triboelectric nanogenerators for ocean wave energy harvesting: State of the art and future perspectives," *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, no. 9, pp. 2657-2683, 2020, doi: 10.1039/d0ee01258k.
- [9] J. W. Lee, B. U. Ye, and J. M. Baik, "Research Update: Recent progress in the development of effective dielectrics for high-output triboelectric nanogenerator," *APL Mater.*, vol. 5, no. 7, 2017, doi: 10.1063/1.4979306.
- [10] H. Wang, J. Cheng, Z. Wang, L. Ji, and Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators for human-health care," *Sci. Bull.*, vol. 66, no. 5, pp. 490-511, 2021, doi: 10.1016/j.scib.2020.10.002.
- [11] J. Chen et al., "Enhancing Performance of Triboelectric Nanogenerator by Filling High Dielectric Nanoparticles into Sponge PDMS Film," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 1, pp. 736-744, 2016, doi: 10.1021/acsami.5b09907.
- [12] S. Hasan, A. Z. Kouzani, S. Adams, J. Long, and M. A. P. Mahmud, "Comparative study on the contact-separation mode triboelectric nanogenerator," *J. Electrostat.*, vol. 116, no. February, p. 103685, 2022, doi: 10.1016/j.elstat.2022.103685.
- [13] J. Chen, J. Wang, W. Xuan, S. Dong, and J. Luo, "Universal triboelectric nanogenerator simulation based on dynamic finite element method model," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 17, pp. 1-14, 2020, doi: 10.3390/s20174838.
- [14] C. Callaty, I. Gonçalves C. Rodrigues, and J. Ventura, "Modeling the performance of contact-separation triboelectric nano-generators."
- [15] R. Wen, J. Guo, A. Yu, J. Zhai, and Z. Lin Wang, "Humidity-Resistive Triboelectric Nanogenerator Fabricated Using Metal Organic Framework Composite," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, no. 20, 2019, doi: 10.1002/adfm.201807655.

- [16] Q. Zhou et al., "High humidity- and contamination-resistant triboelectric nanogenerator with superhydrophobic interface," *Nano Energy*, vol. 57, no. January, pp. 903-910, 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.12.091.
- [17] C. Rodrigues et al., "Triboelectric energy harvesting in harsh conditions: Temperature and pressure effects in methane and crude oil environments," *Nano Energy*, vol. 72, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.104682.
- [18] Z. L. Wang, "On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators," *Matter. Today*, vol. 20, no. 2, pp. 74-82, 2017, doi: 10.1016/j.mattod.2016.12.001.
- [19] S. Wang, L. Lin, and Z. L. Wang, "Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 6339-6346, 2012, doi: 10.1021/nl303573d.
- [20] X. Pu et al., "A self-charging power unit by integration of a textile triboelectric nanogenerator and a flexible lithium-ion battery for wearable electronics," *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 15, pp. 2472-2478, 2015, doi: 10.1002/adma.201500311.
- [21] Z.L. Wang, *Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors*, *ACS Nano*, vol. 7, no. 11, pp. 9533-9557, 2013, doi: 10.1021/nn404614z7
- [22] Y. Wang, Y. Yang, and Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as flexible power sources," *npj Flex. Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-9, 2017, doi: 10.1038/s41528-017-0007-8.
- [23] C. Rodrigues et al., "Integrated study of triboelectric nanogenerator for ocean wave energy harvesting: Performance assessment in realistic sea conditions," *Nano Energy*, vol. 84, no. November 2020, p. 105890, 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.105890.
- [24] C. Rodrigues, A. Gomes, A. Ghosh, A. Pereira, and J. Ventura, "Power-generating footwear based on a triboelectric-electromagnetic-piezoelectric hybrid nanogenerator," *Nano Energy*, vol. 62, no. January, pp. 660-666, 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2019.05.063.
- [25] D. G. Dassanayaka, T. M. Alves, N. D. Wanasekara, I. G. Dharmasena, and J. Ventura, "Recent Progresses in Wearable Triboelectric Nanogenerators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 32, no. 44, 2022, doi: 10.1002/adfm.202205438.



Carlos Miguel Callaty Garcia, é aluno no Programa Doutoral em Engenharia Física na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, tendo sido licenciado e concluído o mestrado em engenharia física na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. O seu trabalho está focado em nanogeradores triboelétricos de contacto e separação e como os mesmos reagem às condições do meio ambiente onde se encontram.



Cátia Rodrigues, é aluna no Programa Doutoral em Física na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e tem-se especializado na produção e desenvolvimento de nanogeradores triboelétricos para operarem em condições adversas e remotas. Atualmente também trabalha na empresa inanoEnergy, onde projeta e desenvolve novas soluções para a Internet das Coisas e captação de energia.



André Pereira, é Professor Auxiliar na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto no Departamento de Física e Astronomia e recebeu o seu Ph.D. em Física pela Faculdade de Ciências da Universidade de Porto em 2010. Desde 2015 tem desenvolvido investigação com foco na inovação de dispositivos de energia flexíveis e versáteis, particularmente no campo da colheita de energia, armazenamento ou transferência de energia. Além disso, continua a trabalhar em magnetismo e física quântica particularmente em materiais com forte correlação entre spin e rede, nanopartículas magnéticas, materiais magnetostriativos e mais recentemente em sistemas topológicos na área de física quântica.



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.