

# FIBRAS ELETROFIADAS PARA APLICAÇÕES EM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

DOI: 10.22533/at.ed.52823131216

### **Helinando Pequeno de Oliveira**

Laboratório de Espectroscopia de Impedância e Materiais Orgânicos, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro – BA

### **Mário César Albuquerque de Oliveira**

Laboratório de Espectroscopia de Impedância e Materiais Orgânicos, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro – BA

### **Ravi Moreno Araujo Pinheiro Lima**

Laboratório de Espectroscopia de Impedância e Materiais Orgânicos, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro – BA

energia independente das fontes fósseis, as soluções atuais para armazenadores de energia devem focar na eficiência e também no gerenciamento de resíduos, com a avaliação ambiental do impacto dos materiais utilizados, estabelecendo a redução imediata e acentuada das fontes fósseis de energia. Com isso, além da geração por fontes alternativas de energia, há uma necessidade iminente de desenvolvimento de novos armazenadores de energia que melhorem o desempenho dos dispositivos convencionais disponíveis no mercado.

## 16.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas eficientes de armazenamento de energia é de fundamental importância frente à finitude de fontes fósseis e das mudanças climáticas, o que exalta a necessidade de redução de emissão de gases causadores do efeito estufa e de lixo proveniente dos eletrônicos. Além da geração de

## 16.2 DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento de energia é realizado de diversas formas, sendo os dispositivos e mecanismos mais comuns: *flywheel*, ar comprimido, energia térmica, energia termoquímica, energia eletroquímica.<sup>1-5</sup>

### 16.2.1 Flywheel

O sistema *flywheel* tem como princípio o armazenamento de energia elétrica na forma de energia cinética. O uso de peças giratórias que armazenam energia sob forma de energia rotacional requer a redução nas perdas por atrito para melhorar a eficiência com o modo de operação do motor-gerador. Atuando como motor, a energia elétrica é fornecida e então é gerado um campo magnético que é convertido em torque e aplicado ao rotor, o que faz com que seja alimentado todo o sistema. No modo gerador, a energia cinética armazenada no rotor aplica um torque que é então convertido em energia elétrica.<sup>6,7</sup>

Embora tenha baixo custo de manutenção, longa vida útil e alta eficiência, esta tecnologia ainda possui, no entanto, alguns gargalos, dos quais podemos citar: o atrito do ar ao redor da roda (perdas aerodinâmicas), perdas relacionadas com o atrito dos rolamentos e a alimentação do sistema de controle de estabilização.<sup>1</sup>

### 16.2.2 Ar comprimido

A tecnologia de armazenamento de energia por ar comprimido usa a compressão do ar a pressões muito altas para o armazenamento do ar comprimido em reservatórios como cavernas salinas e formações rochosas porosas. Esse tipo de tecnologia pode ser utilizado em grande escala (chegando a centenas de MW) e inclui vantagens como longa vida útil e alta confiabilidade, sendo que o principal problema para este tipo de tecnologia é a necessidade de grandes reservatórios de ar.<sup>2</sup>

### 16.2.3 Energia térmica

Os três modos principais para o armazenamento de energia térmica são o sensível, latente e o termoquímico.<sup>8</sup> O armazenamento de energia térmica sensível é aquele em que o fluxo de calor armazenado é seguido do aumento da temperatura do meio em que a energia é armazenada, sendo a água o exemplo de meio mais utilizado. Já o armazenamento de energia térmica latente envolve o processo de mudança de fase do meio de armazenamento. Esse método ganha destaque por apresentar alta densidade de energia, devido ao alto valor do calor latente dos materiais utilizados como armazenadores de energia, o que permite aplicações em larga escala.<sup>7</sup> Por fim, o armazenamento de energia termoquímico é o que usa a energia térmica para estimular uma reação química reversível.

Esses tipos de armazenamento estão presentes em diversas tecnologias encontradas atualmente para armazenamento térmico solar,<sup>9</sup> eficiência energética de edifícios,<sup>10</sup> aplicação de recuperação de calor residual/industrial,<sup>11</sup> conservação térmica e isolamento de edifícios, entre outros.

## 16.2.4 Energia eletroquímica

Os dispositivos mais comuns que fazem uso de armazenamento de energia eletroquímica são as baterias e supercapacitores.

### 16.2.4.1 Baterias

A estrutura básica de uma bateria, apresentada na Figura 16.1a, possui um eletrodo negativo (anodo), que age como um agente redutor (doador de elétrons), um eletrodo positivo (catodo), que é um aceitador de elétrons, e um eletrólito, que é um condutor iônico usado para separar o polo negativo do polo positivo.

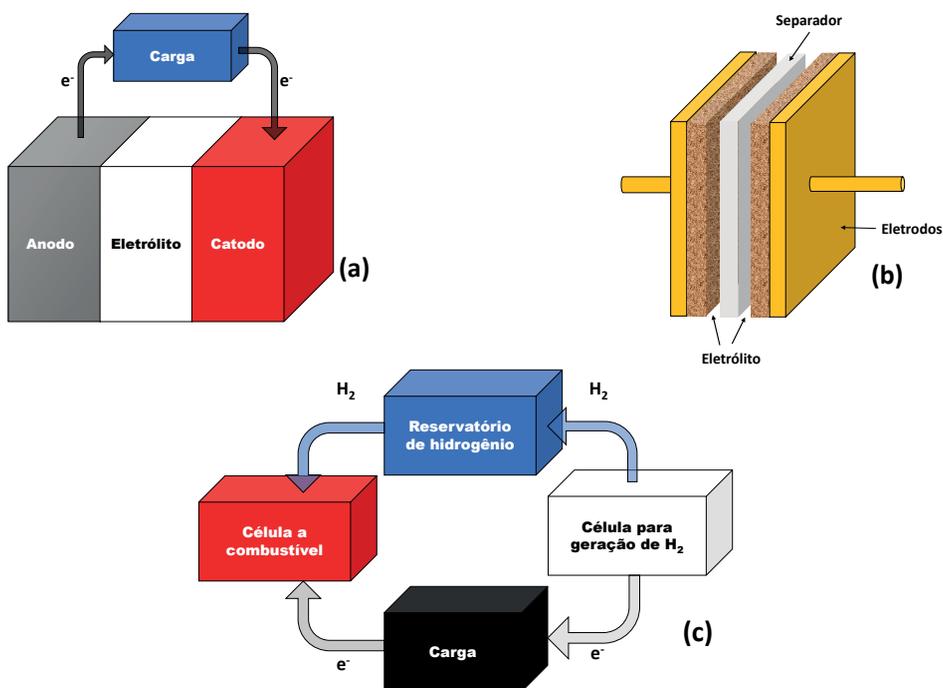


Figura 16.1. Esquema básico de (a) uma bateria, (b) supercapacitor simétrico e (c) célula a combustível conectada a gerador e armazenador de hidrogênio.

Os eletrodos têm papel fundamental no armazenamento de energia, sendo requerida estabilidade estrutural durante o ciclo, o que é observado a partir de uma arquitetura porosa do eletrodo para o transporte de íons de metal alcalino e elétrons livres.<sup>12,13</sup>

Entre os tipos de baterias disponíveis, a bateria de íons de lítio recebe grande atenção devido à sua alta capacitância específica, alta densidade de energia e boa estabilidade cíclica, sendo dominante entre as baterias recarregáveis mais usadas no mercado.<sup>14</sup> Além delas, outras baterias podem ser encontradas no mercado, como as baterias primárias, em que a reação de descarga não é reversível, (como a bateria alcalina, bateria de zinco-carbono) e bateria recarregável (como bateria de chumbo-ácido).<sup>15</sup>

#### 16.2.4.2 Supercapacitores

Os supercapacitores, também chamados de ultracapacitores ou capacitores eletroquímicos, possuem capacitância maior que os capacitores convencionais pois utilizam eletrodos com materiais que possuem área superficial elevada e camada dielétrica delgada,<sup>16,17</sup> sendo capazes de armazenar e liberar sucessivas vezes uma grande quantidade de energia em um curto intervalo de tempo. Essas características de alta densidade de potência e ciclo de vida útil longo viabilizam aplicações em veículos elétricos e híbridos.<sup>18,19</sup>

Dentro do panorama atual para os supercapacitores, alguns fatores são cruciais para seu bom desempenho, tais como: propriedades eletroquímicas dos materiais do eletrodo, eletrólito e janela de potencial dos eletrodos. Esses fatores estabelecem a necessidade de explorar novos materiais com propriedades eletroquímicas superiores.<sup>20</sup> Para tanto, dois mecanismos diferentes são explorados, a saber: o efeito da dupla camada elétrica e a pseudocapacitância.<sup>21–23</sup> No primeiro, o armazenamento de carga ocorre através da separação de cargas (positivas e negativas), ou seja, pelo efeito da atração eletrostática na interface entre o eletrodo e o eletrólito. Já na pseudocapacitância ocorrem reações químicas redox reversíveis faradaicas. A estrutura básica de um supercapacitor é mostrada na Figura 16.1b.

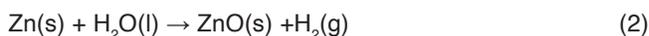
#### 16.2.4.3 Células a combustível a hidrogênio

O princípio de funcionamento de uma célula a combustível a hidrogênio é baseado na conversão da energia química do hidrogênio em energia elétrica e água.<sup>24</sup> Com o fornecimento constante do gás hidrogênio, passa a existir a interação do gás com os eletrodos na presença de catalisadores (platina, platina-rutênio, platina-irídio, entre outros), o que gera um fluxo de elétrons e espécies  $H^+$  que migram via eletrólito através da membrana transportadora de prótons para o outro eletrodo. A reação completa ocorre de acordo com a Equação 1:

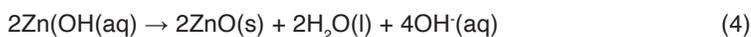


Uma condição necessária é o fornecimento constante de hidrogênio à célula, com o circuito completo (célula de geração de hidrogênio – célula combustível) –esquemático na Figura 16.1c.

Um sistema completo de célula combustível alimentada por um gerador de hidrogênio é exemplificado na referência <sup>25</sup>. Para este sistema, o anodo de zinco é imerso em um eletrólito contendo solução aquosa de hidróxido de potássio. Com isso, tem-se a ocorrência da reação mostrada na Equação 2:



Por sua vez, no anodo, o zinco participa da reação e retorna a óxido de zinco em um processo de duas etapas, descrito nas Equações 3 e 4:



As células combustíveis que usam ácido bromídrico com agente oxidante surgem como alternativas às células regenerativas de  $\text{H}_2/\text{O}_2$  e à necessidade de metais de transição como catalisadores.<sup>26</sup> Estas células usam a eletrólise do HBr durante a carga, que resulta na sua conversão em  $\text{H}_2$  e  $\text{Br}_2$ . Estes compostos são separados externamente e colocados a interagir novamente em células eletroquímicas com barreira de separador iônico à base de ácido perfluorosulfônico, capaz de separar os meios ricos em  $\text{H}_2$  e  $\text{Br}_2$ .

Para efeito de comparação entre o desempenho de supercapacitores, células a combustível e baterias, pode-se ressaltar que os supercapacitores conseguem entregar milhares de vezes mais potência que uma bateria, considerando a mesma massa de dispositivo, já que armazenam energia por reações de adsorção de superfície de espécies carregadas no material do eletrodo. Dessa forma, e aproveitando as vantagens de cada sistema isolado, novos dispositivos chamados de supercapaterias estão sendo desenvolvidos, para assim obter dispositivos híbridos que combinam os recursos encontrados nos supercapacitores e nas baterias para atender a demandas futuras do armazenamento de energia elétrica.<sup>8</sup> O diagrama de Ragone, apresentado na Figura 16.2, compara a posição dos dispositivos no quadrante de densidade de energia (quantidade de energia por unidade de volume) vs. densidade de potência (quantidade de potência por unidade de volume), caracterizando o melhor desempenho das baterias em termos da densidade de energia e dos capacitores em termos de densidade de potência. Assim, evidencia-se a necessidade de desenvolvimento de materiais que possam oferecer simultaneamente ambos os parâmetros em bons níveis, ou seja, o dispositivo ideal deve associar a densidade de potência do capacitor com a densidade de energia da bateria.

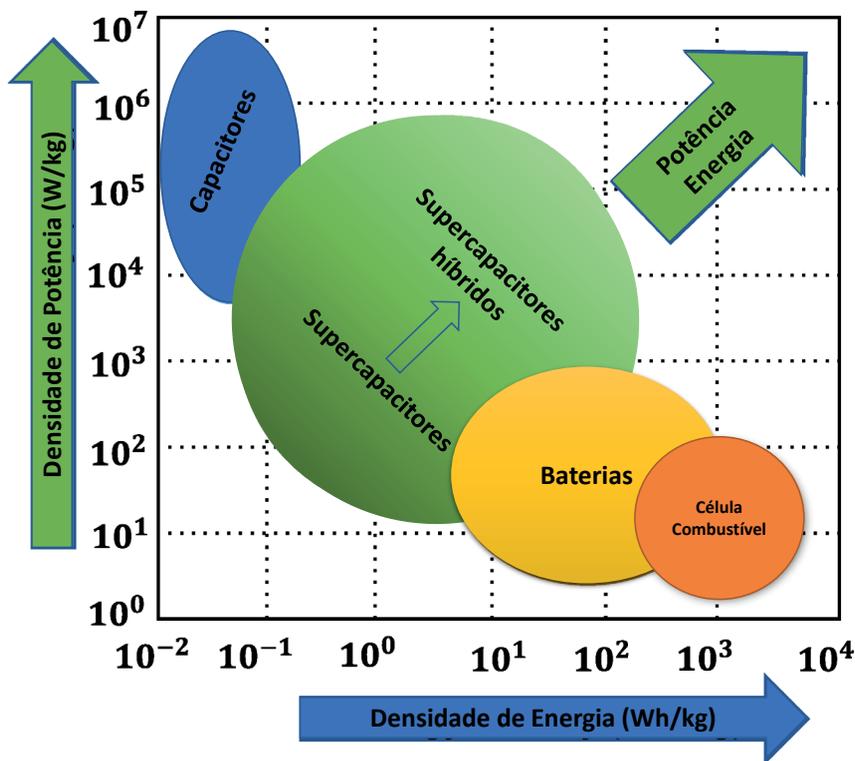


Figura 16.2. Regiões do gráfico de Ragone e as localizações dos dispositivos de armazenamento de energia mais comuns. Adaptada da referência <sup>27</sup> sob os termos da licença Creative Commons 4.0 (CC BY). Copyright 2021 M. Wayu.

### 16.3 RELEVÂNCIA DO USO DE FIBRAS ELETROFIADAS EM DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A literatura tem demonstrado que a técnica de eletrofição vem sendo progressivamente aplicada na produção de armazenadores de energia, viabilizando o controle da morfologia fibrilar e de estruturas do tipo casca-núcleo, fibras ocas e sólidas, aplicáveis em baterias, supercapacitores, células a combustível e no armazenamento de energia térmica, descritas as seguir.

#### 16.3.1 Baterias

As estratégias usadas para otimizar a densidade de energia das baterias concentram-se no aumento da tensão de trabalho, o que pode ser feito com a diminuição do potencial do anodo e com o aumento no potencial do catodo.<sup>28-30</sup> As fibras eletrofiadas, no contexto das baterias, entram como novos materiais que viabilizam vantagens como maior estabilidade cíclica, atenuação na expansão do volume, elevada área superficial, alta relação superfície-volume, alta porosidade e interconectividade dos poros e aplicada na melhor integridade estrutural dos eletrodos.<sup>28-30</sup>

A produção das fibras eletrofiadas de carbono em baterias é feita com o uso do tratamento térmico nas fibras poliméricas produzidas pelo método de eletrofiação sendo convertidas em fibras de carbono. Este processo aumenta a resistência e a condutividade elétrica das fibras, enquanto a flexibilidade e morfologia são mantidas.<sup>31,32</sup> Com isso, são obtidas fibras com alta porosidade aplicáveis nos eletrodos. Apesar de suas vantagens, as fibras de carbono possuem uma densidade de energia limitada, o que pode ser contornado com a introdução de materiais ativos nas fibras eletrofiadas ou revestindo-as (maiores detalhes no Capítulo 2) após o tratamento térmico.<sup>31,32</sup>

O uso de fibras eletrofiadas de poliacrionitrila (PAN) e negro de fumo dopado com nitrogênio (NC) como camada de recobrimento do catodo permitiu que a infiltração do eletrólito fosse melhorada, viabilizando o transporte rápido de íons de lítio.<sup>33</sup> Isto ocorreu devido à boa adesão das fibras na superfície do eletrodo, elevada condutividade e boa afinidade para polissulfetos, uma vez que as células de Li-S ativam a possibilidade de ancorar os polissulfetos e reutilizá-los. A Figura 16.3 esquematiza a relevância da camada eletrofiada (em cinza) no ancoramento destas espécies aplicada na melhoria do desempenho da bateria de Li-S.

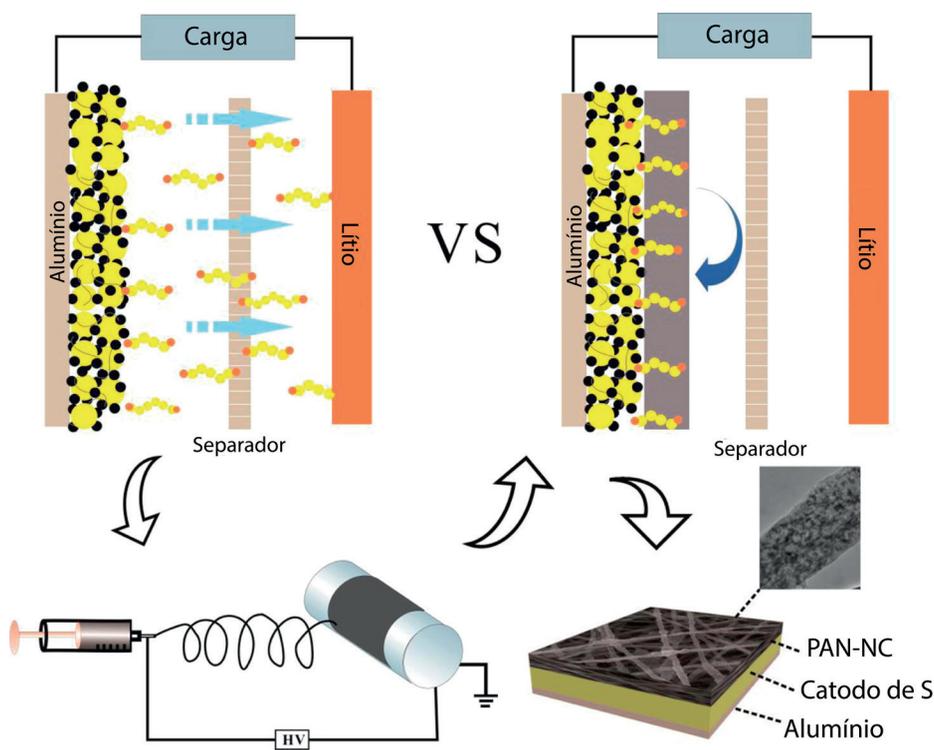


Figura 16.3. Ilustração esquemática da configuração da célula com o processo de modificação promovido pelo catodo de poliacrionitrila (PAN) e negro de fumo dopado com nitrogênio (NC) com eletrodos de lítio e alumínio. Adaptada com permissão da referência <sup>33</sup>. Copyright 2017 American Chemical Society.

### 16.3.2 Supercapacitores

O material usado nos eletrodos tem influência direta no desempenho do supercapacitor. Os eletrodos baseados em carbono, como os nanotubos de carbono (CNTs), nanofibras de carbono (CNFs) e grafeno armazenam energia elétrica formando uma dupla camada elétrica, o que confere aos eletrodos de supercapacitor produzidos a característica de capacitores elétricos de camada dupla (EDLC).<sup>34</sup> Por sua vez, as nanofibras de carbono porosas representam um sistema que tem atraído atenção dada a boa condutividade elétrica e resistência mecânica, a qual está intrinsecamente ligada à dimensão e arranjo estrutural das nanofibras e às interações entre elas.<sup>35,36</sup>

Geralmente, os materiais à base de carbono, como os CNTs, são inicialmente dispersos em matrizes de polímero para formar uma solução precursora, que é posteriormente submetida à eletrofiação para formar fibras híbridas com diversos materiais. Alguns exemplos dos precursores poliméricos utilizados para produção são o poli(álcool vinílico) (PVA), polibenzimidazol, poliamida e PAN.<sup>35</sup>

Além de propriedades relacionadas diretamente ao desempenho das fibras eletrofiadas e sua aplicação como supercapacitores, o processo de eletrofiação pode oferecer outras vantagens. Uma possibilidade é se aproveitar da interação entre o polímero e o material usado como aditivo. A polianilina (PANI), por exemplo, é um polímero condutor insolúvel nos solventes adequados para o processo de eletrofiação, porém a combinação com outros polímeros, como o PVA, favorece a formação de uma solução viscosa em que há a completa dispersão da PANI. Isto se deve à presença de sítios ativos para a formação de ligações de hidrogênio entre os grupamentos  $-NH_2$  da PANI com os grupos laterais  $-OH$  do PVA.<sup>37</sup>

### 16.3.3 Células a combustível

A técnica de eletrofiação tem sido aplicada para produção de camadas de difusão de gás, dando origem a estruturas customizadas para aumentar o desempenho da membrana eletrolítica polimérica das células a combustível.<sup>38</sup> Dada a versatilidade e possibilidade de controlar diversos parâmetros das fibras eletrofiadas (maiores detalhes no Capítulo 2) é possível fabricar camadas de difusão de gás com propriedades adequadas. Para tanto, se faz necessário o controle de parâmetros tais como diâmetro da fibra, tamanho de poro, condutividade térmica, e molhabilidade da fibra, sendo possível reduzir a perda de transporte de massa, além de outras propriedades das camadas de difusão de gás que afetam o transporte de água e reagentes dentro da célula de combustível. Além disso, a capacidade aprimorada de retenção de água das membranas eletrofiadas faz com que seja promissor o seu uso em membranas eletrolíticas poliméricas.<sup>38,39</sup>

Ainda, as fibras eletrofiadas podem ser vistas como catodos fibrosos nas células a combustível. Em comparação com os catodos de pó convencionais, os catodos fibrosos oferecem alta porosidade, vários sítios de contorno de fase tripla, rápida transferência de massa e alta eficiência de transferência de carga.<sup>40</sup>

Em células a combustível de  $H_2/CO_2$ , a eletrofiiação pode ser empregada, por exemplo, para produzir estruturas catalíticas de rutênio impregnadas em nanofibras de carbono dopadas com nitrogênio. Este tipo de sistema explora o efeito sinérgico do rutênio com as espécies nitrogenadas e o aumento de sítios ativos para melhoria na atividade catalítica, com o bom desempenho na oxidação do  $H_2$  no anodo e redução de  $CO_2$  no catodo,<sup>41</sup> como esquematizado na Figura 16.4.

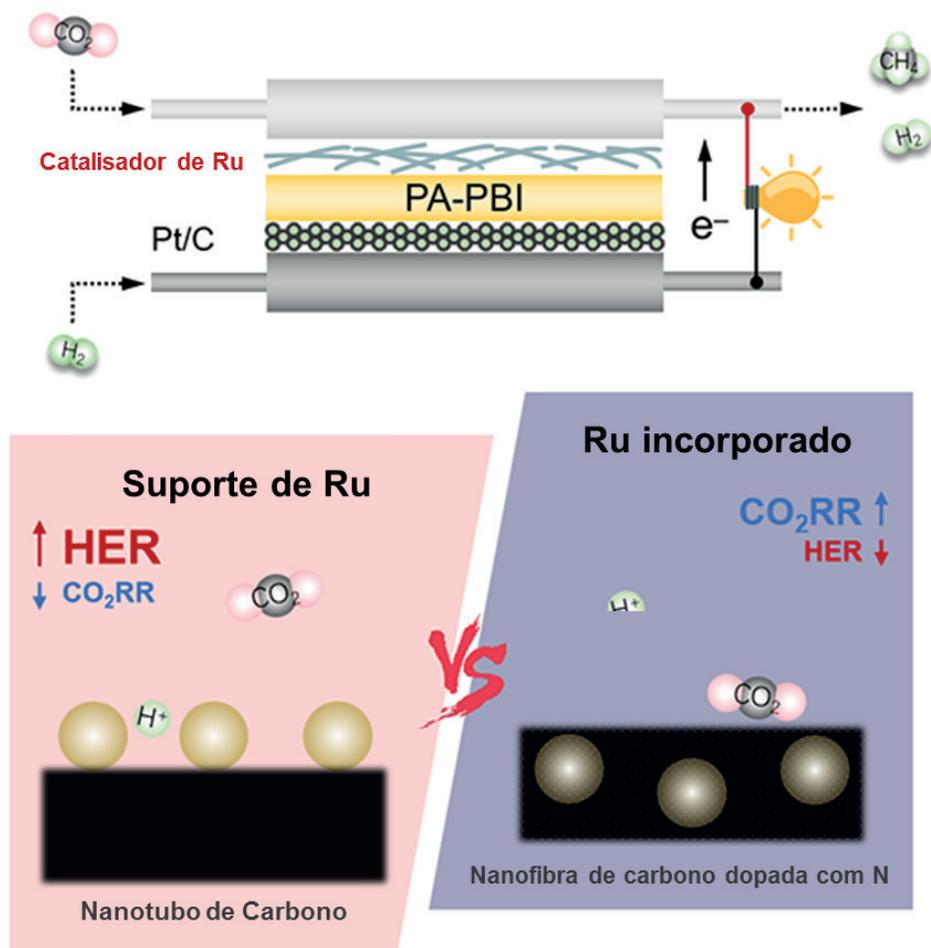


Figura 16.4. Ilustração de uma célula a combustível com funcionamento otimizado pela incorporação de matriz catalítica à base de fibras eletrofiadas de rutênio e separador de ácido fosfórico dopado com polibenzimidazol (PA-PBI). Adaptada com permissão da referência <sup>41</sup>. Copyright 2021 American Chemical Society.

### 16.3.4 Armazenamento de energia térmica

No armazenamento de energia térmica, os chamados materiais de mudança de fase (*Phase Change Material – PCM*) possuem a capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia térmica com pequena variação de temperatura durante a fase de transição. Dispositivos vestíveis à base destes materiais podem, por exemplo, absorver calor do corpo ou do ambiente durante atividades intensas e o liberar durante atividades mais leves ou ambientes frios. Seguindo esse caminho, Haghghat *et al.*<sup>42</sup> demonstraram o desempenho térmico, em condições corporais simuladas, de fibras produzidas pela técnica de eletrofição coaxial. As fibras foram compostas por um núcleo de PCM, utilizando dois tipos de alcanos, o hexadecano e octadecano, e uma casca de poli(vinilpirrolidona) (PVP), testando também a influência do número de camadas (única ou dupla) do material sobre os resultados. Os melhores resultados foram obtidos utilizando o octadecano e duas camadas do material fibroso. Essa configuração conferiu maior potência ao efeito de isolamento.<sup>42</sup>

A termostregulação em materiais inteligentes depende do desempenho térmico dos materiais utilizados para a preparação dos reservatórios. As graxas de parafina são bastante utilizadas para este fim, sendo, no entanto, um grande impedimento para a melhoria na eficiência para campo e armazenamento de calor.<sup>43</sup> Uma solução explorada para melhorar o desempenho de sistemas baseados na parafina se dá com a produção de estruturas casca-núcleo com a parafina no núcleo e poli(metacrilato de metila) (PMMA) como a casca das fibras eletrofiadas, que apresentam calor latente de  $58.25 \text{ J g}^{-1}$  e entalpia de cristalização de  $-56.49 \text{ J g}^{-1}$ .<sup>44</sup> A Figura 16.5 demonstra o efeito da taxa de injeção da solução polimérica sobre a relação entre o diâmetro do núcleo de parafina e a espessura da casca e PMMA.

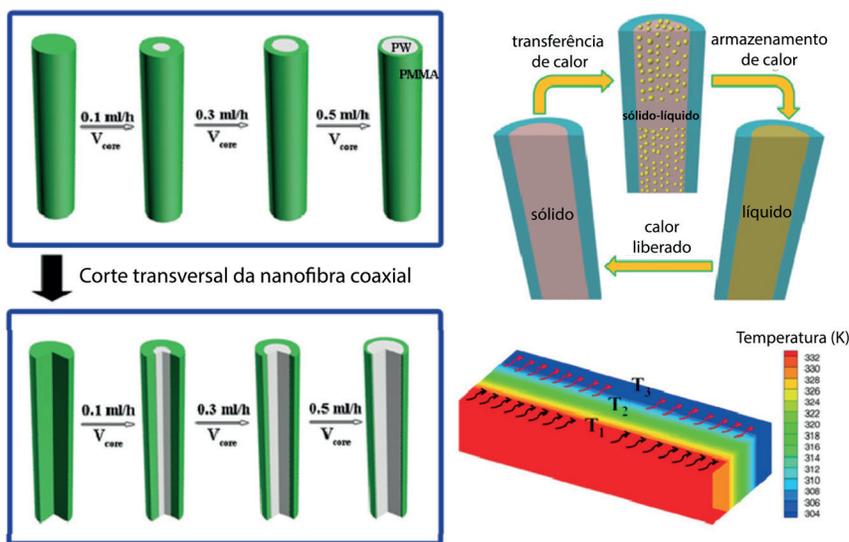


Figura 16.5. Representação do efeito da taxa de injeção na eletrofição sobre a espessura da camada polimérica (casca) recobrendo a estrutura núcleo da fibra produzida à base de parafina (PW) no núcleo e poli(metacrilato de metila) (PMMA) como a casca das fibras. Adaptada com permissão da referência <sup>44</sup>. Copyright 2018 American Chemical Society.

A Tabela 16.1 resume uma série de dispositivos armazenadores de energia que fazem uso de fibras eletrofiadas como elementos ativos para melhoria no desempenho de processos de armazenamento de energia.

Tabela 16.1. Detalhamento dos materiais usados para eletrofição de componentes de armazenadores de energia.

Dispositivo	Parte do dispositivo	Material	Técnica de eletrofição utilizada	Ref.
Bateria	Anodo	PAN-MnCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Eletrofição convencional	45
		LVO@PVP-PAN	Eletrofição convencional	46
		MnO <sub>2</sub> -PAN	Eletrofição convencional	31
		Si@rGO/PAN	Eletrofição convencional	32
	Catodo	PEDOT-S@PAN	Eletrofição coaxial	28
		PAN-MoS <sub>2</sub>	Eletrofição convencional	47
PMMA-PANI		Eletrofição coaxial	48	
Supercapacitor	Eletrodo	NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @NC/PVP	Eletrofição convencional	49
		PANI/PVA/GO	Eletrofição convencional	37
		PAN-MnOx	Eletrofição convencional	35
		PAN/Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Eletrofição convencional	50
		PAN-Fe/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @CNT/CNF	Eletrofição convencional	51
		rGO/PAN	Eletrofição úmida camada por camada	52
		PANI@CNC-CNT/PVA-PAA	Eletrofição convencional	36
		rGO/PANI/PVA	Eletrofição convencional	53
Células de combustível	Membrana eletrolítica	PMMA (Núcleo), PAN/PVP (Casca)	Eletrofição coaxial	54
		Nafion®/PPSU	Eletrofição convencional	26
		PVDF Nanofibers Impregnated with Nafion®	Eletrofição convencional	55
		Nafion/PVDF	Eletrofição convencional	56
		PAN-Co-MA	Eletrofição convencional	57
	Catodo	YCF/PVP-GDC	Eletrofição convencional	58

\*PAN – Poliacrilonitrila; LVO - Vanadato de lítio; PVP – Polivinilpirrolidona; rGO - Óxido de Grafeno Reduzido; GO - Óxido de Grafeno; PEDOT - Poli(3,4-etilenodioxitiofeno); PSS - Poli(estirenosulfonato); PANI – Polianilina; PMMA – Poli(metacrilato de metila) ; PVA – poli(vinil álcool); CNTs - Nanotubos de Carbono; PVDF - Fluoreto de polivinilideno; PPSU – Polifenilsulfona; PAN-Co-MA - Poliacrilonitrila-co-metil acrilato; YCF - YCo<sub>0,5</sub>Fe<sub>0,5</sub>O<sub>3</sub>; GDC - Gd<sub>0,1</sub>Ce<sub>0,9</sub>O<sub>1,95</sub>

## 16.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA APLICAÇÕES EM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A tecnologia de materiais tem sido fundamental para o desenvolvimento de dispositivos armazenadores de energia nas mais diversas formas possíveis, seja para a produção de eletrodos porosos ou membranas trocadoras de prótons, detalhados a seguir.

## 16.4.1 Materiais carbonáceos

Materiais carbonáceos são utilizados em eletrodos de dispositivos armazenadores de energia como baterias, supercapacitores e em células a combustível. Algumas propriedades desses materiais como a estrutura, porosidade e morfologia afetam o desempenho dos armazenadores de energia, como por exemplo, em baterias de potássio, na qual a utilização de carbono amorfo limita a tensão média de operação do anodo e, como consequência a densidade de energia.<sup>30</sup> Dessa forma, a utilização de carbono com estrutura cristalina definida, como o carbono grafitizado com morfologias distintas, pode melhorar o desempenho do dispositivo. A utilização de fibras eletrofiadas com carbono grafitizado melhora a estabilidade cíclica bem como a densidade de energia das baterias.<sup>30</sup>

Materiais carbonáceos, como fibras de carbono para fabricação de tecidos de carbono, têm sido utilizados para aplicações na camada difusora das células combustíveis, pois são capazes de melhorar as reações eletroquímicas, fornecendo caminhos para condução eletrônica/térmica, e podem funcionar como suporte para o eletrodo da célula.<sup>59</sup>

### 16.4.1.1 Carbono ativado

Entre os carbonáceos utilizados em eletrodos de elementos armazenadores de energia, o carbono ativado é o que possui menor custo de produção devido à sua obtenção a partir de materiais residuais como fibra de banana, bambu, casca de semente de girassol, lenha, etc.<sup>60</sup> Adicionalmente, os carbonos ativados são materiais porosos que possuem grande área superficial, o que permite armazenar maiores quantidades de cargas elétricas ao longo da sua estrutura, gerando assim maior capacitância.<sup>19,61,62</sup>

A ativação química do carvão é um procedimento que permite com que o carbonáceo seja revestido com agentes ativadores como  $H_3PO_4$ ,  $K_2CO_3$ , KOH ou  $ZnCl_2$ . Após a impregnação destes elementos, o material é tratado termicamente em atmosfera inerte em diferentes faixas de temperatura.<sup>63,64,65,66</sup> As características superficiais resultantes do carbono após o processo de ativação, como a morfologia e distribuição dos poros ao longo da superfície do material, variam de acordo com o precursor, agentes ativadores usados, temperatura e tempo de processamento.<sup>67</sup> A utilização de KOH como elemento ativador, por exemplo, fornece uma elevada área superficial e uma estrutura de microporos bem definidas. Ainda, ao se utilizar um agente de ativação é possível obter poros com volumes de aproximadamente  $2 \text{ cm}^3/\text{g}$  e carbonos ativados com área superficial de  $2500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ .<sup>68</sup> A porosidade e a distribuição dos poros são fatores que influenciam diretamente no comportamento eletroquímico do carbono ativado, uma vez que são eles que limitam ou permitem maior contato/penetração do eletrólito na interface do eletrodo, o que pode interferir na contribuição do efeito da dupla camada elétrica de armazenamento de carga.<sup>64</sup>

#### 16.4.1.2 Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono representam uma importante alternativa para contornar a limitação dos carvões ativados, que são extremamente dependentes dos ligantes.<sup>69</sup> É possível incorporar CNTs em eletrodos sem utilizar ligantes, gerando um compósito leve que pode ser usado em tensões de operação mais altas.<sup>70</sup>

Além de um elevado módulo de elasticidade (que pode atingir valores da ordem de 1 TPa), os CNTs conseguem ser 100 vezes mais resistentes do que o aço, sendo considerados altamente estáveis eletroquimicamente.<sup>71</sup> Por essas características, esse carbonáceo vem sendo utilizado para a fabricação de eletrodos de supercapacitores.

Um outro exemplo da aplicabilidade dos CNTs é em eletrodos de baterias de íons de lítio. A distribuição de poros e suas conexões ao longo da superfície do material faz com que o eletrólito possa ser facilmente difundido. Além disso, os nanotubos de carbono possuem rápida transferência direcional de carga.<sup>29</sup>

Os nanotubos de carbono livres de modificações superficiais possuem capacitância específica limitada e, semelhante aos carbonáceos, tratamentos físicos ou químicos na sua superfície são capazes de otimizar esses valores, permitindo a observação da capacitância específica com valores entre 20 e 180 F g<sup>-1</sup>.<sup>72</sup>

#### 16.4.1.3 Grafeno

O grafeno possui excelente condutividade elétrica, propriedades mecânicas semelhantes ou até superiores à dos CNTs, área superficial que podem atingir valores acima de 1700 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> e podendo ser facilmente acessado pelo eletrólito.<sup>73</sup> Na literatura já foi reportado grafeno com valores de área superficial de 3100 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> após o processo de ativação com KOH.<sup>74,75</sup> Ainda, o grafeno possui capacitância intrínseca de 21 μF cm<sup>-2</sup>, a maior entre os carbonáceos e com capacidade teórica de carga de 744 mA h g<sup>-1</sup>, maior do que a do grafite. Por esses motivos, o grafeno é considerado um material promissor para aplicações em anodos de baterias e eletrodos de supercapacitores.<sup>76,74,77</sup>

Um dos limitantes a ser superado para aplicações do grafeno é a sua tendência de empilhamento, o que leva a uma redução na área superficial bem como na acessibilidade do eletrólito, resultando na perda da capacitância do material.<sup>76</sup> Para minimizar o empilhamento/aglomeração do grafeno é necessário utilizar técnicas de exfoliação, irradiação por micro-ondas e tratamento térmico. Estes últimos são capazes de produzir folhas de grafeno de alta qualidade com pouca aglomeração, logo, com uma área superficial maior, alta condutividade elétrica e, conseqüentemente, maior capacitância.<sup>78</sup>

## 16.4.2 Polímeros condutores

Os polímeros intrinsecamente condutores são materiais que vem sendo progressivamente utilizados em eletrodos de dispositivos armazenadores de energia.<sup>22,79,80</sup> Esses materiais podem se comportar como isolantes e, na forma dopada, como semicondutores ou metais.<sup>81</sup> Em baterias recarregáveis, os polímeros condutores são utilizados como suportes para catodos devido aos estágios de dopagem e desdopagem do material,<sup>81</sup> assim como pelo fato de melhorarem a ciclabilidade dos eletrodos. Ainda, esses materiais fornecem flexibilidade ao eletrodo, melhorando a sua estabilidade. Os polímeros condutores também podem ser utilizados como suporte catalisador em células combustíveis devido às propriedades elétricas desses materiais.<sup>82</sup> Além da síntese simples e de baixo custo, os polímeros condutores possuem mecanismo rápido de carga e descarga. Os polímeros condutores mais utilizados para tais aplicações são o polipirrol (PPy),<sup>83</sup> PANI e poli(3,4-etilenodioxitiofeno) (PEDOT),<sup>84</sup> descritos a seguir.

### 16.4.2.1 Polipirrol

O PPy é considerado o polímero condutor mais favorável para aplicações em eletrodos de elementos armazenadores de energia devido à sua alta condutividade elétrica ( $50\text{-}100\text{ S cm}^{-1}$ ), alta capacitância teórica ( $620\text{ F g}^{-1}$ ), capacidade de energia entre  $90\text{-}110\text{ A h kg}^{-1}$ , estabilidade química e facilidade de síntese.<sup>85</sup> Em baterias de íons de lítio, as propriedades eletroquímicas do eletrodo são influenciadas pela espessura do filme de polipirrol no catodo. Por exemplo, quanto maior a espessura do polímero no eletrodo, maior será a capacidade de carga da bateria.<sup>86</sup> Um limitante para o PPy em supercapacitores está relacionado à sua retenção capacitiva após sucessivos ciclos de carga e descarga.<sup>5,21,87,88</sup> Durante o processo de carga desse polímero conjugado do tipo p, os átomos de nitrogênio presentes em sua estrutura adquirem carga positiva, atraindo contra-ânions do eletrólito, fazendo com que ocorra o acúmulo de carga nessa região e, conseqüentemente, um aumento no volume. Na descarga, os átomos de nitrogênio tornam-se neutros, fazendo com que os contra-ânions sejam afastados, gerando uma redução de carga e volume naquela região.

### 16.4.2.2 Polianilina

A PANI possui boa condutividade elétrica, forte atividade pseudocapacitiva associada a vários estágios de oxidação e pode ser facilmente sintetizada.<sup>22</sup> De forma similar ao PPy, a vida útil de dispositivos à base de polianilina é considerada um fator limitante para a sua aplicação em supercapacitores. Nos ciclos de carga e descarga, a estrutura da PANI é comprometida devido ao aumento e diminuição do volume de íons de forma repetitiva, ocasionando perda no desempenho capacitivo do material, o que resulta em baixa retenção capacitiva, limitando a sua aplicação nos dispositivos armazenadores de energia.<sup>89</sup>

### 16.4.2.3 Poli(3,4-etilenodioxitiofeno)

Os métodos mais utilizados para polimerizar o monômero de EDOT são a polimerização eletroquímica e a deposição química de vapor.<sup>90</sup> Entretanto, é possível obter maior adesão entre o polímero e a matriz a ser polimerizada como também maior condutividade elétrica e maior mobilidade de carga a partir da utilização da técnica de deposição química de vapor.<sup>91,92</sup>

O PEDOT possui *band gap* entre 1 e 3 eV, condutividade elétrica teórica variando de 300 a 500 S cm<sup>-1</sup>, é quimicamente e termicamente estável e capaz de operar em amplas faixas de potencial mantendo a sua estabilidade eletroquímica.<sup>93,90</sup> Supercapacitores à base de PEDOT são capazes de suportar 400 mil ciclos de carga e descarga, mantendo uma perda de na retenção capacitiva de apenas 20% quando utilizados em líquidos iônicos.<sup>94</sup>

### 16.4.3 Óxidos metálicos

A utilização de óxidos metálicos na escala nanométrica melhora o desempenho de baterias de íons de lítio, devido à grande área superficial que essas estruturas fornecem, facilitando o transporte dos íons de Li ao promover maior interação entre o eletrodo e o eletrólito.<sup>95</sup> Nos óxidos metálicos, semelhantemente aos polímeros condutores, o armazenamento de carga se dá pelo mecanismo da pseudocapacitância, porém são mais estáveis quando submetidos a ciclos de carga e descarga.<sup>96</sup> Quando comparado com os carbonáceos, os óxidos metálicos são capazes de armazenar maior quantidade de carga e fornecer maior densidade de energia, porém a sua condutividade elétrica é baixa.<sup>97</sup> Os óxidos metálicos comumente utilizados em eletrodos são: RuO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub>, NiO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> e V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.<sup>98</sup>

O óxido de rutênio (RuO<sub>2</sub>) é um material com alta capacitância específica teórica (1358 F g<sup>-1</sup>),<sup>99</sup> termicamente e quimicamente estável,<sup>100</sup> porém o custo elevado e sua toxicidade limita a sua aplicação em armazenadores de energia.<sup>102</sup>

Devido à ampla faixa de potencial de trabalho, elevada densidade de energia e capacitância teórica (1370 F g<sup>-1</sup>)<sup>99</sup> e capacidade de carga específica teórica de 1233 mA h g<sup>-1</sup>, além de ser um material de baixo custo e não poluente, o óxido de manganês (MnO<sub>2</sub>) é considerado um material potencial para aplicações em eletrodos.<sup>103</sup>

Por outro lado, devido à sua estrutura em camadas, diversos estágios de oxidação, matéria-prima em abundância, alta capacitância teórica (2120 F g<sup>-1</sup>) e alta capacidade teórica de carga (294 mA h g<sup>-1</sup>) além da facilidade de síntese, o óxido de vanádio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) tem sido aplicado como material ativo em eletrodos de armazenadores de energia.<sup>99,104</sup> Como outros óxidos metálicos, o V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tem baixa condutividade elétrica sendo necessário ter controle da estrutura na síntese e o uso associado a carbonáceos para melhorar o desempenho do material.<sup>104</sup>

## 16.4.4 Compósitos

Outras estruturas do tipo metal-orgânicas (do inglês MOF) com importantes aplicações em eletrocatalise e armazenamento de energia são preparadas a partir da eletrofiliação de estruturas de nanotubos de carbono dopados com nitrogênio confinando nanopartículas de cobalto, como descrito na referência,<sup>105</sup> caracterizando um método simples e de baixo custo para produzir estruturas multifuncionais carbonáceas dopadas. A Figura 16.6 esquematiza a preparação das estruturas dopadas a partir das eletrofiliação.<sup>105</sup>

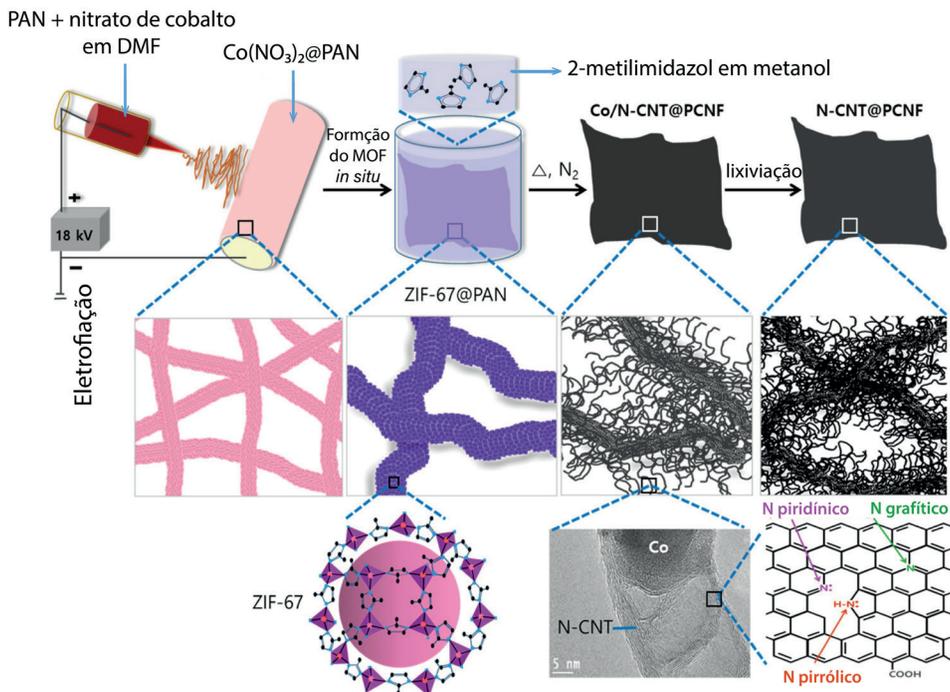


Figura 16.6. Esquema geral da preparação das estruturas metal-polímero a partir da eletrofiliação, tratamento térmico e em meio ácido para preparação de eletrodos copados com heteroátomos e cobalto e nitrogênio em matrizes de nanotubos de carbono (Co/N-CNT) em nanofibras de carbono grafítico poroso (PCNF) resultando nas amostras de Co/N-CNT@PCNF e N-CNT@PCNF resultando em modificações de estrutura piridínica e pirrólica. Adaptada com permissão da referência <sup>105</sup>. Copyright 2021 American Chemical Society.

A combinação dos efeitos da dupla camada elétrica e da pseudocapacitância fornece melhores propriedades eletroquímicas e mecânicas aos eletrodos dos armazenadores de energia. Desse modo, a combinação entre carbonáceos e polímeros condutores ou entre carbonáceos e óxidos metálicos em compósitos que atuem de forma sinérgica é extremamente relevante para o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes.<sup>22,106</sup>

A dopagem dos carbonáceos com polímeros condutores melhora a condutividade elétrica, a capacitância e outras propriedades eletroquímicas. Além disso, os polímeros condutores também são beneficiados pelas propriedades do efeito da dupla camada

elétrica, gerando aumento na densidade de potência e estabilidade cíclica. As propriedades mecânicas dos polímeros também são melhoradas devido às propriedades mecânicas dos carbonáceos. Quando comparado com os carbonáceos, os óxidos metálicos são capazes de armazenar maior quantidade de carga e fornecer maior densidade de energia, porém a sua condutividade elétrica é baixa.<sup>97</sup> Dessa forma, é necessário associar os óxidos metálicos com os carbonáceos para que se possa unir as vantagens dos dois materiais.<sup>107</sup>

## 16.5 FIBRAS ELETROFIADAS APLICADAS EM ARMAZENADORES DE ENERGIAS

### 16.5.1 Supercapacitores

Eletrodos com grande área superficial e porosidade controlada melhoram as propriedades eletroquímicas dos dispositivos armazenadores de energia como supercapacitores, baterias e células combustíveis. A eletrofiação viabiliza estas propriedades, fornecendo materiais com área da seção transversal em escala nanométrica, o que fornece área superficial elevada. Geralmente as fibras eletrofiadas são baseadas em materiais compósitos formados a partir da combinação de materiais carbonáceos com polímero condutores e/ou óxidos metálicos.<sup>53</sup> O desempenho de diferentes dispositivos à base de fibras eletrofiadas compósitas é apresentada na Tabela 16.2.

Tabela 16.2. Desempenho de supercapacitores preparados à base de fibras eletrofiadas.

Materiais	Capacitância específica (F g <sup>-1</sup> )	Densidade de energia (W h kg <sup>-1</sup> )	Densidade de potência (W kg <sup>-1</sup> )	Ref.
PANI@CNT-CNC/ PVA-PAA	155,5	13,8	200,3	36
rGO-PAN N <sub>2</sub>	221	33,01	301	52
PANI-PVA	105	-	-	53
rGO-PANI-PVA	174	-	-	
NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @NC	2000,6	-	-	49
PANI-PVA	143,3	-	-	37
PANI-PVA-GO	438,8	-	-	
PAN-ZIF-67	970	54,6	360,6	50
CNF-MnO <sub>2</sub> /PPy	315	13,68	485,22	35
PEDOT	167,92	-	-	93
PVA/PEDOT	182,73	-	-	
PVA-GO/PEDOT	224,27	10,11	93,04	
f-CNFs/PPy	290,83	-	-	108
f-CNFs/MnO <sub>2</sub>	322,96	-	-	
f-CNFs/PPy/MnO <sub>2</sub>	409,88	42,53	297,32	
Fe/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @CNT-CNF	194,6	27,03	375	51

Dos resultados apresentados na Tabela 16.2, é importante destacar as membranas de fibras eletrofiadas a partir da utilização de nanocristais de celulose (CNC), PVA, poli(ácido acrílico) (PAA), nanotubos de carbono (CNTs) e PANI.<sup>36</sup> Essas membranas foram utilizadas como eletrodos de supercapacitor, com mecanismo de armazenamento de carga da dupla camada elétrica e da pseudocapacitância, gerando um valor da capacitância específica de 155,5 F g<sup>-1</sup>. Já no trabalho desenvolvido por Shi *et al.*<sup>52</sup> foi obtida uma capacitância de 221 F g<sup>-1</sup> ao se utilizar fibras eletrofiadas de PAN com óxido de grafeno (GO) tratadas termicamente em uma atmosfera contendo nitrogênio (N<sub>2</sub>). A diferença entre os valores de capacitância dos dois trabalhos pode ser explicada por dois fatores, sendo o primeiro relacionado à área superficial do grafeno, que é maior do que a dos CNTs e dessa forma mais sítios estão disponíveis para o armazenamento das cargas. O segundo está relacionado à dopagem com o nitrogênio, a qual melhora as propriedades eletroquímicas do grafeno de forma semelhante a utilização de polímeros condutores, entretanto, sem ter a estabilidade cíclica comprometida.<sup>109</sup>

Também é possível observar a influência do óxido de grafeno incorporado com a PANI no trabalho desenvolvido por Chen *et al.*,<sup>53</sup> em que foram produzidas fibras eletrofiadas à base de PANI-PVA e também fibras com óxido de grafeno reduzido (rGO), PVA e PANI (RGO-PANI-PVA). A capacitância obtida pelo compósito PANI-PVA foi de 105 F g<sup>-1</sup> enquanto para a amostra de rGO-PANI-PVA foi de 174 F g<sup>-1</sup>. Isso ocorre devido à baixa condutividade elétrica das fibras de PANI-PVA e ao fato de que, ao incorporar o rGO, ocorre a diminuição na resistência elétrica devido às suas propriedades elétricas e também porque há maior deposição da PANI sobre as fibras, potencializando o efeito da pseudocapacitância. De forma semelhante, Rose *et al.*<sup>37</sup> observaram um aumento na capacitância específica de aproximadamente 300% após a incorporação do óxido de grafeno (GO) nas fibras de PAN/PVA, devido à sinergia entre o carbonáceo e o polímero condutor. Mohd *et al.*<sup>93</sup>-ethylenedioxythiophene verificaram a influência do óxido de grafeno na matriz polimérica de PVA e PEDOT. A capacitância das fibras de PVA/PEDOT foi de 182,73 F g<sup>-1</sup>, enquanto as fibras modificadas com o óxido de grafeno (PVA/GO/PEDOT) apresentaram capacitância de 224,27 F g<sup>-1</sup>.

Com o objetivo de verificar a influência da incorporação da colbaltita de níquel (NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) em carbonos dopados com nitrogênio (NC), Li *et al.*<sup>49</sup> produziram fibras eletrofiadas de NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@NC. Devido à interconexão entre essas duas estruturas, foi possível obter uma capacitância específica de 2000,6 F g<sup>-1</sup>. Entretanto, houve uma redução de 20,2% da capacitância inicial após 5000 ciclos. Isso ocorre devido ao efeito de encolhimento e expansão do volume que afeta os polímeros condutores e óxidos metálicos. Lu *et al.*<sup>50</sup> também produziram fibras eletrofiadas utilizando óxido metálico. Neste trabalho, a fibra de PAN com estrutura nanoporosa de óxido de colbato imidazolato zeolítico (ZIF-67), (PAN/ZIF-67), forneceu a capacitância específica de 970 F g<sup>-1</sup>, mas também verificou uma redução significativa de 22,5 % do valor inicial da capacitância após 5000 ciclos. Aftab

*et al.*<sup>51</sup> produziram nanofibras de carbono contendo CNTs e incorporaram o óxido de ferro (II,III) ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) na estrutura ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @CNT-CNF). Após 5000 ciclos foi possível manter uma retenção capacitiva da ordem de 95%. O crescimento dos nanotubos de carbono fez com que o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  fosse encapsulado em uma estrutura protetora condutora com forte interação com as nanofibras de carbono, reduzindo o efeito da instabilidade cíclica relacionada ao  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

## 16.5.2 Baterias

De forma similar aos supercapacitores, observa-se uma tendência crescente do uso de fibras eletrofiadas nas estruturas de baterias. Sistemas de destaque que exploram as fibras eletrofiadas para este fim são sumarizados na Tabela 16.3 e detalhados na sequência.

Tabela 16.3. Desempenho de baterias que usam componentes à base de fibras eletrofiadas.

Materiais	Desempenho eletroquímico	Ref.
$\text{MnCo}_2\text{O}_4$ nanotubos	701,4 mA h g <sup>-1</sup> depois de 320 ciclos a 0,5 A g <sup>-1</sup>	45
S@MoS@CNF	1211 mA h g <sup>-1</sup> a 0,1 C; Queda da capacidade de carga e descarga de 0,035% após 400 ciclos	47
LVO@CNFs	603 mA h g <sup>-1</sup> , com 90% de retenção da capacidade de carga e descarga após 200 ciclos a 0,5 A g <sup>-1</sup>	46
N-CNFs Co, N-CNFs	596 mA h g <sup>-1</sup> depois de 150 ciclos a 0,2 C 938 mA h g <sup>-1</sup> depois de 300 ciclos a 0,2 C	110
IG_MOCNF	545 mA h g <sup>-1</sup> depois de 1000 ciclos a 1 A g <sup>-1</sup>	31
NCNFs PEDOT:PSS	983 mA h g <sup>-1</sup> depois de 100 ciclos a 0,1 C	111
S/C S/C/PEDOT-S@PAN	265 mA h g <sup>-1</sup> depois de 100 ciclos a 0,1 C 433 mA h g <sup>-1</sup> depois de 100 ciclos a 0,1 C	28
Si NPs	478 mA h g <sup>-1</sup> - 20,5% de retenção da capacidade de carga e descarga a 0,5 A g <sup>-1</sup>	32
Si@RGO/C NFs	929 mA h g <sup>-1</sup> - 83,1% de retenção da capacidade de carga e descarga a 0,5 A g <sup>-1</sup>	

Zhu *et al.*<sup>45</sup> reportam a produção de fibras eletrofiadas de PAN/nanotubos de cobaltita de manganês ( $\text{MnCo}_2\text{O}_4$ ), a partir do tratamento térmico a 400 °C de fibras de PAN contendo íons manganês(II), para aplicações em anodos de baterias de íons de lítio. A estrutura de nanotubos melhorou o transporte de elétrons e a difusão de íons. Dessa forma, os valores obtidos no primeiro ciclo de descarga/carga do eletrodo de  $\text{MnCo}_2\text{O}_4$  foram de 1211,9 e 711,6 mA h g<sup>-1</sup>, respectivamente. Inicialmente a capacidade de descarga do eletrodo decresce até um certo ponto e depois volta a crescer, sendo esse efeito caracterizado pela influência da junção de dois metais de transição (Mn e Co). Depois de 320 ciclos a uma corrente de 0,5 A g<sup>-1</sup>, foi mantido uma capacidade de descarga de 701,4 mA h g<sup>-1</sup>.

No trabalho realizado por Wang *et al.*,<sup>47</sup> foram produzidas nanofibras de carbono dopadas com dissulfeto de molibdênio em matriz de enxofre (S@MoS<sub>2</sub>@CNF) e fibras sem MoS<sub>2</sub> (S@CNF) para utilização em catodos de baterias de lítio e enxofre. Quando comparado com S@CNF, o S@MoS<sub>2</sub>@CNF apresentou eficiência coulombica de 99%. Além disso, após 50 ciclos de carga e descarga, a impedância do S@MoS<sub>2</sub>@CNF foi menor do que a do eletrodo S@CNF, mostrando assim a influência da dopagem com MoS<sub>2</sub> no desempenho eletroquímico do eletrodo. Liu *et al.*<sup>46</sup> reportam a síntese de nanofibras de carbono na qual foram encapsulados vanadato de lítio (LVO) para aplicações em anodo de baterias de íons de lítio. O eletrodo LVO@CNFs forneceu a capacidade reversível de descarga de 603 mA h g<sup>-1</sup> a 0,5 A g<sup>-1</sup> com uma capacidade de retenção de 90% após 200 ciclos. A estrutura da fibra de carbono juntamente com a estrutura do LVO gera sítios ativos e caminhos para difusão de íons, além disso, a contribuição do efeito da pseudocapacitância na velocidade de transferência de carga melhora o desempenho do eletrodo. Dessa forma, o desempenho do eletrodo está relacionado com a sinergia entre o vanadato de lítio e o carbonáceo.

Yao *et al.*<sup>110</sup> compararam a influência do cobalto (Co) no desempenho eletroquímico de CNFs dopadas com nitrogênio. Para isso, foram produzidos dois tipos de nanofibras, uma com cobalto (Co, N-CNFs) outra sem cobalto (N-CNFs) e foi adicionado o polissulfeto de lítio (Li<sub>2</sub>S<sub>6</sub>) em cada uma das fibras para formar um compósito (eletrodo). Foi avaliado o desempenho cíclico de ambos os materiais como eletrodos de baterias de lítio/polissulfetos em que o eletrodo Co,N-CNFs/ Li<sub>2</sub>S<sub>6</sub> forneceu a primeira capacidade de descarga de 1166 mA h g<sup>-1</sup> e reteve 938 mA h g<sup>-1</sup> dessa capacidade após 300 ciclos a 0,2 C, enquanto que o eletrodo N-CNFs/ Li<sub>2</sub>S<sub>6</sub> após 150 ciclos teve uma redução na sua capacidade de 790 para 596 mA h g<sup>-1</sup>, indicando que o cobalto facilita as reações redox do polissulfeto.

Park *et al.*<sup>31</sup> avaliaram a influência do grafeno e do MnO<sub>2</sub> em nanofibras de carbono. A capacidade de descarga para a CNF foi de 346 mA h g<sup>-1</sup> a uma densidade de corrente de 0,1 A g<sup>-1</sup>. Ao revestir a CNF com MnO<sub>2</sub> (MOCNF), a capacidade de descarga aumentou para 945 mA h g<sup>-1</sup> e depois de intercalar camadas de grafeno (IG\_MOCNF), a capacidade caiu para 936 mA h g<sup>-1</sup>. Porém, a uma densidade de corrente de 5 A g<sup>-1</sup>, o IG\_MOCNF conseguiu reter 554 mA h g<sup>-1</sup> da sua capacidade inicial. Isso ocorre por causa da estrutura porosa do MnO<sub>2</sub> que facilita a mobilidade dos íons, bem como possibilita maior utilização do MnO<sub>2</sub> e reduz o efeito da polarização das reações redox em altas densidades de corrente. O efeito da combinação entre o MnO<sub>2</sub> e o grafeno faz com que o eletrodo (IG\_MOCNF) seja capaz de reter 545 mA h g<sup>-1</sup> da capacidade de descarga após 1000 ciclos a uma densidade de corrente de 1 A g<sup>-1</sup>. Essa intercalação entre o carbonáceo e o óxido metálico faz com que o efeito de encolhimento e expansão do volume gerado pelo óxido metálico seja reduzido, facilitando as reações redox nos processos de carga e descarga para reverter a baixa condutividade e ciclabilidade da rede de nanofibras de carbono (NCNFs).

Zhong *et al.*<sup>111</sup> revestiram a fibra de carbono com PEDOT e sulfonato de poliestireno (PSS). A fibra NCNFs-S com uma concentração de enxofre de 2,6 mg obteve o valor de

827 mA h g<sup>-1</sup> a 0,1 C para a primeira capacidade de descarga e, após 100 ciclos este valor caiu para 296 mA h g<sup>-1</sup> devido ao tamanho dos poros que facilita a dissolução de LiPSs. De forma semelhante, Raulo *et al.*<sup>28</sup> utilizaram fibras eletrofiadas com enxofre e com PEDOT:PSS (PEDOT-S@PAN) para avaliar a influência da incorporação desse compósito em matriz de enxofre e negro de fumo (S/C) como catodos de baterias de lítio e enxofre. O eletrodo S/C obteve a capacidade inicial de descarga de 683 mA h g<sup>-1</sup> a 0,1 C e após 100 ciclos reteve apenas 265 mA h g<sup>-1</sup>, porém ao adicionar PEDOT:PSS (S/C/PEDOT-S@PAN) o eletrodo forneceu uma capacidade inicial de descarga de 739 mA h g<sup>-1</sup> e após 100 ciclos reteve 433 mA h g<sup>-1</sup>, indicando otimização da capacidade eletroquímica do eletrodo ao incorporar o compósito PEDOT-S@PAN. Ainda, a uma corrente de 0,5 C e após 500 ciclos, o S/C/PEDOT-S@PAN reteve aproximadamente 40% da capacidade de descarga inicial. A incorporação do PEDOT:PSS contornou o problema da baixa condutividade do enxofre, e o compósito PEDOT-S@PAN também melhorou as propriedades mecânicas do eletrodo e restringiu o efeito da dissolução de LiPS durante os ciclos de descarga.

Com o objetivo de conter a expansão das nanopartículas de silício em eletrodos de baterias, Yan *et al.*<sup>32</sup> produziram fibras eletrofiadas com camadas de grafeno e nanofibras de carbono. Os autores verificaram o desempenho das nanopartículas de silício (Si NPs) e também do eletrodo a partir da incorporação de grafeno e das nanofibras de carbono (Si@RGO/C NFs). Após 100 ciclos, Si NPs reteve 20,5% da sua capacidade de descarga inicial e a amostra de Si@RGO/C NFs conseguiu reter 83,1%. Os carbonáceos foram capazes de amortecer a variação do volume do silício, reduzindo a concentração de tensão e com isso, reduzir a degradação do eletrodo.

## 16.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

O bom desempenho requerido para os dispositivos armazenadores de energia à base de fibras eletrofiadas deve alcançar um balanço delicado entre área superficial, porosidade e condutividade elétrica, com a adequada reversibilidade na expansão/retração de volume ao longo de sucessivas cargas e descargas. Desta forma, os efeitos na redução da condutividade elétrica com o aumento na porosidade assim como a perda na retenção capacitiva com o aumento na componente pseudocapacitiva precisam atingir uma condição de equilíbrio que associe bom desempenho eletroquímico à ciclabilidade dos dispositivos preparados. Com isso, os processos de pirólise de matrizes eletrofiadas, a impregnação com óxidos metálicos e recobrimento de fibras com camadas de polímeros condutores surgem como importantes estratégias que tendem a buscar a sinergia entre processos, potencializando as melhores propriedades de cada componente como forma de otimizar o desempenho de novos dispositivos com as vantagens do baixo custo de produção da eletrofiação.

## REFERÊNCIAS

1. Šonský, J.; Tesař, V. ;*J. Energy Storage* **2019**, *24*, 100765.
2. Song, J.; Peng, X.; Fang, X.; Han, Y.; Deng, Z.; Xu, G.; Liang, L.; Hou, J.; Wu, H. ;*Therm. Sci. Eng. Prog.* **2020**, *19*, 100598.
3. Zhu, W.; Wang, Y.; Song, S.; Ai, H.; Qiu, F.; Li, D.; Dong, L. ;*Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2021**, *222*, 110939.
4. Randhir, K.; King, K.; Petrasch, J.; Klausner, J. ;*Energy Technol.* **2020**, *8*, 2000063.
5. Lima, R. M. A. P.; de Oliveira, M. C. A.; de Oliveira, H. P. ;*SN Appl. Sci.* **2019**, *1*, 325.
6. Olabi, A. G.; Wilberforce, T.; Abdelkareem, M. A.; Ramadan, M. ;*Energies* **2021**, *14*, 2159.
7. Arabkoohsar, A. In *Mechanical Energy Storage Technologies*; Elsevier, 2021; Vol. 1, pp. 1–12.
8. Koohi-Fayegh, S.; Rosen, M. A. ;*J. Energy Storage* **2020**, *27*, 101047.
9. Zhao, J.; Yuan, Y.; Haghighat, F.; Lu, J.; Feng, G. ;*Energy* **2019**, *172*, 141.
10. Cao, V. D.; Bui, T. Q.; Kjøniksen, A.-L. ;*Energy* **2019**, *186*, 115792.
11. Miró, L.; Gasia, J.; Cabeza, L. F. ;*Appl. Energy* **2016**, *179*, 284.
12. Fang, S.; Bresser, D.; Passerini, S. ;*Adv. Energy Mater.* **2020**, *10*, 1902485.
13. Li, X.; Chen, W.; Qian, Q.; Huang, H.; Chen, Y.; Wang, Z.; Chen, Q.; Yang, J.; Li, J.; Mai, Y.-W. ;*Adv. Energy Mater.* **2021**, *11*, 2000845.
14. Pistoia, G. In *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*; Elsevier, 2009; pp. 29–38.
15. Yang, Y.; Okonkwo, E. G.; Huang, G.; Xu, S.; Sun, W.; He, Y. ;*Energy Storage Mater.* **2021**, *36*, 186.
16. Zhang, H.; Wang, J.; Sun, Y.; Zhang, X.; Yang, H.; Lin, B. ;*J. Alloys Compd.* **2021**, *879*, 160423.
17. Burke, A. ;*J. Power Sources* **2000**, *91*, 37.
18. Xia, X.; Chao, D.; Fan, Z.; Guan, C.; Cao, X.; Zhang, H.; Fan, H. J. ;*Nano Lett.* **2014**, *14*, 1651.
19. Shabeeba, P.; Thayyil, M. S.; Pillai, M. P.; Soufeena, P. P.; Niveditha, C. V. ;*Russ. J. Electrochem.* **2018**, *54*, 302.
20. Mei, H.; Mei, Y.; Zhang, S.; Xiao, Z.; Xu, B.; Zhang, H.; Fan, L.; Huang, Z.; Kang, W.; Sun, D. ;*Inorg. Chem.* **2018**, *57*, 10953.
21. Reis, G. S. dos; Oliveira, H. P. de; Larsson, S. H.; Thyrel, M.; Claudio Lima, E. ;*Nanomaterials* **2021**, *11*, 424.

22. Alcaraz-Espinoza, J. J.; de Oliveira, H. P. ;*Electrochim. Acta* **2018**, *274*, 200.
23. de Oliveira, H. P.; Sydlík, S. A.; Swager, T. M. ;*J. Phys. Chem. C* **2013**, *117*, 10270.
24. Dodds, P. E.; Staffell, I.; Hawkes, A. D.; Li, F.; Grünewald, P.; McDowall, W.; Ekins, P. ;*Int. J. Hydrogen Energy* **2015**, *40*, 2065.
25. Hahn, R.; Gabler, A.; Thoma, A.; Glaw, F.; Lang, K.-D. ;*Int. J. Hydrogen Energy* **2015**, *40*, 5340.
26. Park, J.; Wycisk, R.; Pintauro, P.; Yarlagadda, V.; Van Nguyen, T. ;*Materials (Basel)*. **2016**, *9*, 143.
27. Wayu, M. ;*Solids* **2021**, *2*, 232.
28. Raulo, A.; Bandyopadhyay, S.; Ahamad, S.; Gupta, A.; Srivastava, R.; Formanek, P.; Nandan, B. ;*J. Power Sources* **2019**, *431*, 250.
29. Bui, H. T.; Kim, D. Y.; Kim, D. W.; Suk, J.; Kang, Y. ;*Carbon N. Y.* **2018**, *130*, 94.
30. Tian, S.; Jiang, Q.; Cai, T.; Wang, Y.; Wang, D.; Kong, D.; Ren, H.; Zhou, J.; Xing, W. ;*J. Power Sources* **2020**, *474*, 228479.
31. Park, J. H.; Choi, W. Y.; Lee, S.; Kim, T.-S.; Lee, J. W. ;*Electrochim. Acta* **2020**, *348*, 136310.
32. Yan, Y.; Guo, H.; Wang, Z.; Li, X.; Yan, G.; Wang, J. ;*Acta Metall. Sin. (English Lett.* **2021**, *34*, 329.
33. Yueying, P.; Yiyong, Z.; Yinhui, W.; Xiu, S.; Feng, W.; He, L.; Bing-Joe, H.; Jinbao, Z. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 29804.
34. Lekakou, C.; Moudam, O.; Markoulidis, F.; Andrews, T.; Watts, J. F.; Reed, G. T. ;*J. Nanotechnol.* **2011**, *2011*, 1.
35. Mohd Abdah, M. A. A.; Mohammed Modawe Aldris Edris, N.; Kulandaivalu, S.; Abdul Rahman, N.; Sulaiman, Y. ;*Int. J. Hydrogen Energy* **2018**, *43*, 17328.
36. Han, J.; Wang, S.; Zhu, S.; Huang, C.; Yue, Y.; Mei, C.; Xu, X.; Xia, C. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 44624.
37. Rose, A.; Guru Prasad, K.; Sakthivel, T.; Gunasekaran, V.; Maiyalagan, T.; Vijayakumar, T. ;*Appl. Surf. Sci.* **2018**, *449*, 551.
38. Balakrishnan, M.; Shrestha, P.; Lee, C.; Ge, N.; Fahy, K. F.; Messerschmidt, M.; Scholta, J.; Eifert, L.; Maibach, J.; Zeis, R.; Hatton, B. D.; Bazylak, A. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 2414.
39. Rajabalizadeh Mojarrad, N.; Iskandarani, B.; Taşdemir, A.; Yürüm, A.; Alkan Gürsel, S.; Yazar Kaplan, B. ;*Int. J. Hydrogen Energy* **2021**, *46*, 13583.
40. Zhang, X.; Ji, L.; Toprakci, O.; Liang, Y.; Alcoutlabi, M. ;*Polym. Rev.* **2011**, *51*, 239.
41. Qu, T.; Hu, J.; Dai, X.; Tan, Q.; Liu, Y.; Chen, Y.; Guo, S.; Liu, Y. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 23523.

42. Haghghat, F.; Hosseini Ravandi, S. A.; Esfahany, M. N.; Valipouri, A.; Zarezade, Z. ;*Appl. Therm. Eng.* **2019**, *161*, 113924.
43. Sun, X.; Liu, L.; Mo, Y.; Li, J.; Li, C. ;*Appl. Therm. Eng.* **2020**, *181*, 115992.
44. Lu, Y.; Xiao, X.; Zhan, Y.; Huan, C.; Qi, S.; Cheng, H.; Xu, G. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, *10*, 12759.
45. Zhu, L.; Li, F.; Yao, T.; Liu, T.; Wang, J.; Li, Y.; Lu, H.; Qian, R.; Liu, Y.; Wang, H. ;*Energy and Fuels* **2020**, *34*, 11574.
46. Liu, T.; Yao, T.; Li, L.; Zhu, L.; Wang, J.; Li, F.; Wang, H. ;*J. Colloid Interface Sci.* **2020**, *580*, 21.
47. Wang, H.; Wei, D.; Zheng, J.; Zhang, B.; Ling, M.; Hou, Y.; Liang, C. ;*ACS Appl. Energy Mater.* **2020**, *3*, 11893.
48. Han, H.; Lu, H.; Jiang, X.; Zhong, F.; Ai, X.; Yang, H.; Cao, Y. ;*Electrochim. Acta* **2019**, *301*, 352.
49. Li, J.; Liu, Y.; Zhan, D.; Zou, Y.; Xu, F.; Sun, L.; Xiang, C.; Zhang, J. ;*J. Energy Storage* **2021**, *39*, 102665.
50. Lu, Y.; Liu, Y.; Mo, J.; Deng, B.; Wang, J.; Zhu, Y.; Xiao, X.; Xu, G. ;*J. Alloys Compd.* **2021**, *853*, 157271.
51. Aftab, F.; Tanveer, S.; Rehman, S. U.; Ghafoor, S.; Duran, H.; Kirchoff, K.; Lieberwirth, I.; Arshad, S. N. ;*Synth. Met.* **2020**, *269*, 116575.
52. Shi, H. T. H.; Jang, S.; Reza-Ugalde, A.; Naguib, H. E. ;*ACS Appl. Energy Mater.* **2020**, *3*, 987.
53. Chen, Z.; Jiang, Y.; Xin, B.; Jiang, S.; Liu, Y.; Lin, L. ;*J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2020**, *31*, 5958.
54. Delikaya, Ö.; Bevilacqua, N.; Eifert, L.; Kunz, U.; Zeis, R.; Roth, C. ;*Electrochim. Acta* **2020**, *345*, 136192.
55. Li, Y.; Hui, J.; Kawchuk, J.; O'Brien, A.; Jiang, Z.; Hoorfar, M. ;*Fuel Cells* **2019**, *19*, 43.
56. Woo Park, J.; Wycisk, R.; Lin, G.; Ying Chong, P.; Powers, D.; Van Nguyen, T.; Dowd Jr., R. P.; Pintauro, P. N. ;*J. Memb. Sci.* **2017**, *541*, 85.
57. Chan, S.; Jankovic, J.; Susac, D.; Saha, M. S.; Tam, M.; Yang, H.; Ko, F. ;*J. Mater. Sci.* **2018**, *53*, 11633.
58. Yang, J.; Wang, J.; Fu, L.; Wu, K.; Liu, Z.; Wu, K.; Zhou, J. ;*Energy & Fuels* **2021**, *35*, 1768.
59. Zhang, X.; Huang, Y.; Zhou, X.; Wang, F.; Luo, Z.; Wu, Q. ;*J. Power Sources* **2020**, *448*, 227410.
60. Ngofa, O. N.; Liakos, E. V.; Papadopoulos, A. N.; Kyzas, G. Z. ;*Biointerface Res. Appl. Chem.* **2021**, *12*, 2701.
61. Li, B.; Dai, F.; Xiao, Q.; Yang, L.; Shen, J.; Zhang, C.; Cai, M. ;*Energy Environ. Sci.* **2016**, *9*, 102.

62. Raymundo-Piñero, E.; Kierzek, K.; Machnikowski, J.; Béguin, F. ;*Carbon N. Y.* **2006**, *44*, 2498.
63. Subramanian, V.; Luo, C.; Stephan, A. M.; Nahm, K. S.; Thomas, S.; Wei, B. ;*J. Phys. Chem. C* **2007**, *111*, 7527.
64. Inal, I. I. G.; Holmes, S. M.; Banford, A.; Aktas, Z. ;*Appl. Surf. Sci.* **2015**, *357*, 696.
65. Teo, E. Y. L.; Muniandy, L.; Ng, E.-P.; Adam, F.; Mohamed, A. R.; Jose, R.; Chong, K. F. ;*Electrochim. Acta* **2016**, *192*, 110.
66. Ma, F.; Ding, S.; Ren, H.; Liu, Y. ;*RSC Adv.* **2019**, *9*, 2474.
67. Farzana, R.; Rajarao, R.; Bhat, B. R.; Sahajwalla, V. ;*J. Ind. Eng. Chem.* **2018**, *65*, 387.
68. Babel, K.; Jurewicz, K. ;*J. Phys. Chem. Solids* **2004**, *65*, 275.
69. Izadi-Najafabadi, A.; Yasuda, S.; Kobashi, K.; Yamada, T.; Futaba, D. N.; Hatori, H.; Yumura, M.; Iijima, S.; Hata, K. ;*Adv. Mater.* **2010**, *22*, 235.
70. Popov, K. M.; Arkhipov, V. E.; Kurennya, A. G.; Fedorovskaya, E. O.; Kovalenko, K. A.; Okotrub, A. V.; Bulusheva, L. G. ;*Phys. Status Solidi Basic Res.* **2016**, *253*, 2406.
71. Kaempgen, M.; Chan, C. K.; Ma, J.; Cui, Y.; Gruner, G. ;*Nano Lett.* **2009**, *9*, 1872.
72. Portet, C.; Taberna, P. L.; Simon, P.; Flahaut, E. ;*J. Power Sources* **2005**, *139*, 371.
73. Skrypnychuk, V.; Boulanger, N.; Nordenström, A.; Talyzin, A. ;*J. Phys. Chem. Lett.* **2020**, *11*, 3032.
74. Zhao, B.; Liu, P.; Jiang, Y.; Pan, D.; Tao, H.; Song, J.; Fang, T.; Xu, W. ;*J. Power Sources* **2012**, *198*, 423.
75. Kim, T.; Jung, G.; Yoo, S.; Suh, K. S.; Ruoff, R. S. ;*ACS Nano* **2013**, *7*, 6899.
76. Liu, C.; Yu, Z.; Neff, D.; Zhamu, A.; Jang, B. Z. ;*Nano Lett.* **2010**, *10*, 4863.
77. Zhang, X.; Suresh Kumar, P.; Aravindan, V.; Liu, H. H.; Sundaramurthy, J.; Mhaisalkar, S. G.; Duong, H. M.; Ramakrishna, S.; Madhavi, S. ;*J. Phys. Chem. C* **2012**, *116*, 14780.
78. Yang, H.; Kannappan, S.; Pandian, A. S.; Jang, J. H.; Lee, Y. S.; Lu, W. ;*Nanotechnology* **2017**, *28*, 445401.
79. Suppes, G. M.; Deore, B. A.; Freund, M. S. ;*Langmuir* **2008**, *24*, 1064.
80. De Oliveira, A. H. P.; José, J. A.; De Oliveira, H. P. ;*Polimeros* **2013**, *23*, 196.
81. Gurunathan, K.; Amalnerkar, D. P.; Trivedi, D. C. ;*Mater. Lett.* **2003**, *57*, 1642.
82. Simotwo, S. K.; Kalra, V. ;*Electrochim. Acta* **2016**, *198*, 156.

83. de Oliveira, A. H. P.; de Oliveira, H. P. ;*J. Power Sources* **2014**, *268*, 45.
84. Alvi, F.; Ram, M. K.; Basnayaka, P. A.; Stefanakos, E.; Goswami, Y.; Kumar, A. ;*Electrochim. Acta* **2011**, *56*, 9406.
85. Yun, T. G.; Hwang, B. Il; Kim, D.; Hyun, S.; Han, S. M. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, *7*, 9228.
86. Osaka, T.; Naoi, K.; Ogano, S.; Nakamura, S. ;*Chem. Lett.* **1986**, *15*, 1687.
87. de Oliveira, H. P.; Sydlík, S. A.; Swager, T. M. ;*J. Phys. Chem. C* **2013**, *117*, 10270.
88. Alcaraz-Espinoza, J. J.; de Melo, C. P.; de Oliveira, H. P. ;*ACS Omega* **2017**, *2*, 2866.
89. Cong, H.-P.; Ren, X.-C.; Wang, P.; Yu, S.-H. ;*Energy Environ. Sci.* **2013**, *6*, 1185.
90. Anothumakkool, B.; Soni, R.; Bhange, S. N.; Kurungot, S. ;*Energy Environ. Sci.* **2015**, *8*, 1339.
91. Rajesh, M.; Raj, C. J.; Manikandan, R.; Kim, B. C.; Park, S. Y.; Yu, K. H. ;*Mater. Today Energy* **2017**, *6*, 96.
92. Wang, H.; Diao, Y.; Lu, Y.; Yang, H.; Zhou, Q.; Chrulski, K.; D'Arcy, J. M. ;*Nat. Commun.* **2020**, *11*, 3882.
93. Mohd Abdah, M. A. A.; Zubair, N. A.; Azman, N. H. N.; Sulaiman, Y. ;*Mater. Chem. Phys.* **2017**, *192*, 161.
94. Lehtimäki, S.; Suominen, M.; Damlin, P.; Tuukkanen, S.; Kvarnström, C.; Lupo, D. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, *7*, 22137.
95. AbdelHamid, A. A.; Yu, Y.; Yang, J.; Ying, J. Y. ;*Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1701427.
96. Zheng, J. H.; Zhang, R. M.; Yu, P. F.; Wang, X. G. ;*J. Alloys Compd.* **2019**, *772*, 359.
97. Aloqayli, S.; Ranaweera, C. K.; Wang, Z.; Siam, K.; Kahol, P. K.; Tripathi, P.; Srivastava, O. N.; Gupta, B. K.; Mishra, S. R.; Perez, F.; Shen, X.; Gupta, R. K. ;*Energy Storage Mater.* **2017**, *8*, 68.
98. Radhamani, A. V.; Krishna Surendra, M.; Ramachandra Rao, M. S. ;*Mater. Des.* **2018**, *139*, 162.
99. Xu, J.; Zheng, F.; Xi, C.; Yu, Y.; Chen, L.; Yang, W.; Hu, P.; Zhen, Q.; Bashir, S. ;*J. Power Sources* **2018**, *404*, 47.
100. Hu, C.-C.; Chang, K.-H.; Lin, M.-C.; Wu, Y.-T. ;*Nano Lett.* **2006**, *6*, 2690.
101. Kim, Y.; Yoon, J.; Park, G. O.; Park, S. Bin; Kim, H.; Kim, J. M.; Yoon, W.-S. ;*J. Power Sources* **2018**, *396*, 749.
102. Iqbal, N.; Wang, X.; Ge, J.; Yu, J.; Kim, H.-Y.; Al-Deyab, S. S.; El-Newehy, M.; Ding, B. ;*RSC Adv.* **2016**, *6*, 52171.

103. Liu, Y.; Zeng, Z.; Sharma, R. K.; Gbewonyo, S.; Allado, K.; Zhang, L.; Wei, J. ;*J. Power Sources* **2019**, *409*, 1.
104. Thangappan, R.; Kalaiselvam, S.; Elayaperumal, A.; Jayavel, R. ;*Solid State Ionics* **2014**, *268*, 321.
105. Mukhiya, T.; Muthurasu, A.; Tiwari, A. P.; Chhetri, K.; Chae, S.-H.; Kim, H.; Dahal, B.; Lee, B. M.; Kim, H. Y. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 23732.
106. Alcaraz-Espinoza, J. J.; de Melo, C. P.; de Oliveira, H. P. ;*ACS Omega* **2017**, *2*, 2866.
107. Yang, Y.; Yang, F.; Hu, H.; Lee, S.; Wang, Y.; Zhao, H.; Zeng, D.; Zhou, B.; Hao, S. ;*Chem. Eng. J.* **2017**, *307*, 583.
108. Mohd Abdah, M. A. A.; Abdul Rahman, N.; Sulaiman, Y. ;*Ceram. Int.* **2019**, *45*, 8433.
109. Jeong, H. M.; Lee, J. W.; Shin, W. H.; Choi, Y. J.; Shin, H. J.; Kang, J. K.; Choi, J. W. ;*Nano Lett.* **2011**, *11*, 2472.
110. Yao, S.; Guo, R.; Xie, F.; Wu, Z.; Gao, K.; Zhang, C.; Shen, X.; Li, T.; Qin, S. ;*Electrochim. Acta* **2020**, *337*, 135765.
111. Zeng, S.-Z.; Yao, Y.; Tu, J.; Tian, Z.; Zou, J.; Zeng, X.; Zhu, H.; Kong, L. B.; Han, P. ;*Ionics (Kiel)*. **2021**, *27*, 3887.

## SOBRE OS AUTORES



**HELINANDO PEQUENO DE OLIVEIRA:** Possui graduação em Engenharia Eletrônica (2000) pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Mestrado em Física pela UFPE (2002) e Doutorado em Física pela UFPE (2004), com Pós-Doutorado no Massachusetts Institute of Technology (2012). É professor Titular da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) desde 2020 e professor da instituição desde 2004, membro da Academia Pernambucana de Ciências (cadeira 19), bolsista em produtividade em pesquisa do CNPq (nível 1C) e da Câmara de Assessoramento e Avaliação da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia (FACEPE) do Estado de Pernambuco (Ciências Exatas e da Terra). Coordenou o programa de pós-graduação em ciência dos materiais nos primeiros anos de implantação (2007-2011) e foi pró-reitor de pesquisa, pós-graduação e inovação entre 2012 e 2016 da Univasf. Desenvolve pesquisa com ênfase em propriedades elétricas de polímeros condutores e nanoestruturas orgânicas com aplicações em sensores, supercapacitores, adsorventes, células combustível biológicas e agentes antibacterianos.

<http://lattes.cnpq.br/5382132010377738>



**MÁRIO CÉSAR ALBUQUERQUE DE OLIVEIRA:** Graduado em Eng. Mecânica (UNIVASF), Mestre em Ciência dos Materiais (UNIVASF) e atualmente é doutorando em Ciência dos Materiais na Universidade Federal do Vale do São Francisco com foco em propriedades ópticas de lasers aleatórios flexíveis e desenvolvimento de dispositivos armazenadores de energia com ênfase em supercapacitores.

<http://lattes.cnpq.br/6562190807090476>



**RAVI MORENO ARAUJO PINHEIRO LIMA:** Graduado em engenharia mecânica (2016) e mestre em ciência dos materiais (2018) pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Doutorando em ciência dos materiais pelo programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais (PGCM) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Atualmente trabalhando no desenvolvimento de supercapacitores a partir da produção de eletrodos em matrizes variadas revestidos com materiais carbonáceos e polímeros condutores.

<http://lattes.cnpq.br/3707639743886144>