

## Supercapacitores: Revisão

### Supercapacitors: Review

### Supercondensadores: Revisión

Recebido: 26/10/2022 | Revisado: 06/11/2022 | Aceitado: 08/11/2022 | Publicado: 15/11/2022

#### **Izabella Helena Werneck Soares Rezende**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8359-7305>  
Instituto Militar de Engenharia, Brasil  
E-mail: [izawerneck@hotmail.com](mailto:izawerneck@hotmail.com)

#### **Luiz Eduardo Pizarro Borges**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2337-4238>  
Instituto Militar de Engenharia, Brasil  
E-mail: [luiz@ime.eb.br](mailto:luiz@ime.eb.br)

#### **Robson Pacheco Pereira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8129-0243>  
Instituto Militar de Engenharia, Brasil  
E-mail: [robsonpacheco@ime.eb.br](mailto:robsonpacheco@ime.eb.br)

#### **Resumo**

Sabe-se que em um dispositivo de conversão e armazenamento de energia, possuir alta densidade de potência e notável durabilidade são características de grande relevância. O supercapacitor (SC) possui essas duas características, porém, ainda é necessário enfrentar desafios durante a fabricação e o gerenciamento do SC. Por isso, o estudo de novos materiais para suprir essas lacunas existentes nesse dispositivo se faz necessário. Desta forma, o objetivo deste trabalho consistiu em discutir os princípios de funcionamento de diferentes materiais – como óxidos metálicos, polímeros intrinsecamente condutores e materiais à base de carbono – com potencial para a produção de supercapacitores mais eficientes. Estes serão abordados tanto do ponto de vista da pesquisa quanto da aplicação, juntamente com suas propriedades, área específica e capacitância. Além disso, aplicações industriais descritas na literatura também são discutidas com o objetivo de avaliar qualitativamente e quantitativamente os progressos recentes da pesquisa e incentivar inovações no controle e gerenciamento do SC.

**Palavras-chave:** Energia; Supercapacitor; Nanotecnologia.

#### **Abstract**

It is known that in an energy conversion and storage device, having high power density and remarkable durability are characteristics of great relevance. The supercapacitor (SC) has these two characteristics, however, it is still necessary to face challenges during the fabrication and management of the SC. Therefore, the study of new materials to fill these gaps in this device is necessary. Thus, the objective of this work was to discuss the working principles of different materials – such as metallic oxides, intrinsically conductive polymers and carbon-based materials – with the potential to produce more efficient supercapacitors. These will be addressed from both a research and an application point of view, along with their properties, specific area and capacitance. In addition, industrial applications described in the literature are also discussed in order to qualitatively and quantitatively assess recent research progress and encourage innovations in SC control and management.

**Keywords:** Energy; Supercapacitor; Nanotechnology.

#### **Resumen**

Sabe-se que em um dispositivo de conversão e armazenamento de energia, possuir alta densidade de potência e notável durabilidade são características de gran relevancia. O supercapacitor (SC) possui essas duas characteristics, porém, ainda é necesário enfrentarnos durante la fabricación y o gerenciamento do SC. Por isso, o estudo de nuevos materiales para suprir essas lacunas existentes nesse dispositivo se faz necessário. Desta forma, o el objetivo de este trabajo consiste em discutir los principios de funcionamiento de diferentes materiales – como óxidos metálicos, polímeros intrínsecamente condutores y materiales a base de carbono – con potencial para una producción de supercapacitores más eficientes. Estes serão abordados tanto do ponto de vista da pesquisa quanto da aplicação, juntamente com suas propriedades, area especifico e capacitância. Além disso, aplicações industriales descritas na literatura também são discutidas com o objetivo de avaliar qualitativamente y quantitativamente os progressos recentes da pesquisa e incentivar inovações no controle e gerenciamento do SC.

**Palabras clave:** Energía; Supercondensador; Nanotecnología.

## 1. Introdução

O consumo acelerado de energia, em particular oriunda dos combustíveis fósseis, está acarretando diversas preocupações sobre os custos ambientais gerados a partir da sua utilização, como mudanças climáticas e danos ambientais. O desenvolvimento de tecnologias energéticas sustentáveis é um caminho promissor para resolver os problemas mencionados. Os rápidos avanços pelos quais as tecnologias de conversão e armazenamento de energia vêm passando nos últimos anos têm tornado seu uso mais sustentáveis em termos de redução do consumo e impacto ambiental (Yang et al., 2020).

Tecnologias de conversão e armazenamento de energia eficientes e econômicas são os mecanismos chave para o desenvolvimento de sistemas de energia renovável. Atualmente, existem diversos dispositivos com esse tipo de sistema em diferentes aplicações, como, por exemplo, baterias recarregáveis, sistemas de distribuição de energia elétrica mediados por controladores digitais, transporte, membranas trocadoras de íons, eletrodomésticos, produtos eletrônicos, painéis solares, dentre outros (Han et al., 2020, Oca et al., 2019). Porém, mesmo sendo utilizados em diversas aplicações, ainda existem muitos desafios para suprir as deficiências em seus sistemas, como sobrepotência e cinética lenta acarretam um maior consumo de energia extra, vida útil curta, alto custo dos catalisadores, manutenção da densidade de energia, e, eficiência em uma ampla faixa de temperatura. A fim de superar essas deficiências, torna-se necessário o desenvolvimento de novos materiais que são simultaneamente eficientes e duráveis (Qiu et al., 2020).

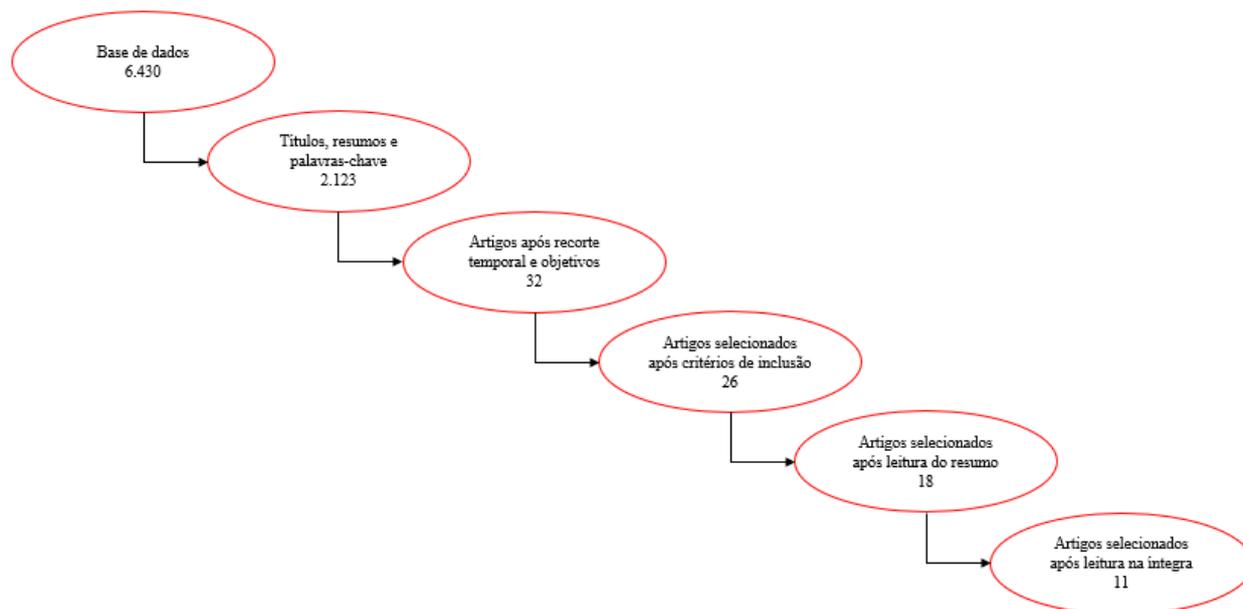
Além disso, os dispositivos criados objetivando a conversão e armazenamento de energia poderão proporcionar uma alteração na forma como a energia é distribuída e utilizada. Dentre eles, o supercapacitor é uma promissora tecnologia de conversão e armazenamento de energia que combina a alta potência específica de um capacitor com a alta energia específica de uma bateria (Zhang et al., 2018a, Maksound et al., 2021).

## 2. Metodologia

Trata-se de uma revisão bibliográfica de caráter integrativo, uma vez que, tentou-se juntar e concatenar aspectos relevantes e atuais da tecnologia discutida (supercapacitores) com ênfase nos materiais empregados (Alves et al., 2022). Foi realizada uma seleção de materiais nas seguintes plataformas de pesquisa: Science Direct e Google Scholar, para pesquisa de artigos publicados no período de 2018 a 2022, utilizando com comando de busca os seguintes termos indexadores em português e inglês: nanotecnologia, supercapacitores, capacitores eletroquímicos de dupla camada, pseudocapacitores, óxidos metálicos, matriz porosa à base de carbono, grafite, óxido de grafeno, óxido de grafeno reduzido, polímeros condutores, polianilina, polipirrol, politiofeno, eletrólitos para supercapacitor, bateria e aplicações do supercapacitor.

Para inclusão no referencial teórico, a maior parte das referências relevantes para a área abordada no artigo situa-se no intervalo dos últimos 4 anos. Foram escolhidos artigos e revisões bibliográficas que discutissem conceitos fundamentais, funcionamento de dispositivos de conversão e armazenamento de energia, melhorias no dispositivo final, perspectivas futuras. Os artigos que foram publicados anteriormente a 2018 e que não apresentassem no seu referencial teórico assuntos relevantes e complementares foram dispensados. Assim, para a realização da discussão foram selecionados um total de 11 trabalhos, como apresentado a seguir na Figura 1.

**Figura 1 - Seleção de artigos.**



Fonte: Autores.

Os 11 artigos selecionados para a elaboração do trabalho e que farão parte da discussão do presente artigo estão dispostos no Quadro 1:

**Quadro 1 - Trabalhos utilizados para discussão do artigo.**

<b>Autor/Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Metodologia</b>
(Han <i>et al.</i> , 2020)	Functionalised Hexagonal Boron Nitride for Energy Conversion and Storage	Estudo de caso
(Li <i>et al.</i> , 2018)	Electrode materials, electrolytes and challenges in nanoaqueous lithium-ion capacitors	Estudo descritivo
(Maksound <i>et al.</i> , 2021)	Advanced materials and Technologies for supercapacitors used in energy conversion and storage: a review	Pesquisa descritiva
(Najib & Erdem, 2019)	Current progress achieved in novel materials for supercapacitor electrodes: mini review	Pesquisa exploratória
(Oca <i>et al.</i> , 2019)	Lithium-ion capacitor safety assessment under electrical abuse tests based on ultrasound characterization and cell opening	Estudo de caso
(Qiu <i>et al.</i> , 2020)	Metal-organic framework-based materials for energy conversion and storage	Pesquisa exploratória
(Wang <i>et al.</i> , 2019)	A highly elastic and reversibly stretchable all-polymer supercapacitor	Estudo descritivo
(Wang <i>et al.</i> , 2020)	Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review	Pesquisa bibliográfica
(Xu <i>et al.</i> , 2020)	Recent progress in metal-organic framework-based supercapacitor electrode materials	Pesquisa bibliográfica
(Yang <i>et al.</i> , 2020)	Advanced oxygen electrocatalysis in energy conversion and storage	Pesquisa bibliográfica
(Zhang <i>et al.</i> , 2018a)	A review of supercapacitor modeling, estimation and applications: a control/management perspective	Pesquisa exploratória

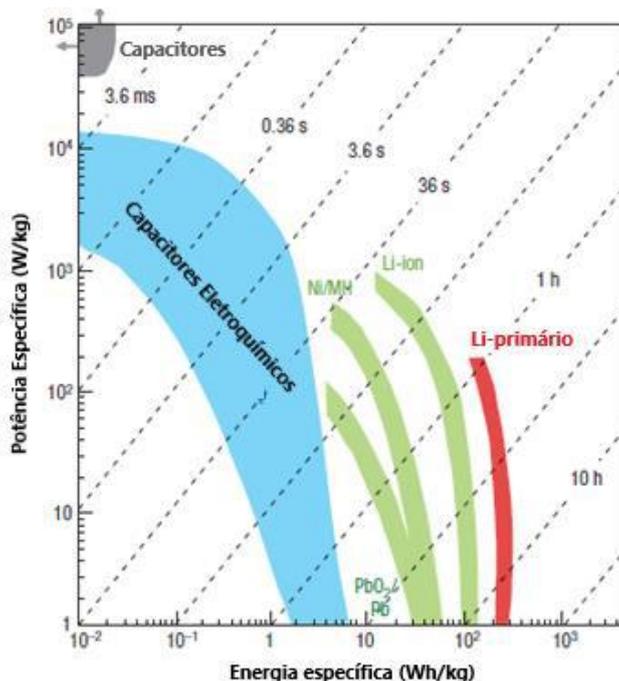
Fonte: Autores.

### 3. Supercapacitor

O desenvolvimento de um dispositivo de armazenamento de energia que seja eficiente e econômico pode acarretar em grandes benefícios para a indústria de energia e para os seres humanos. Porém, é necessário avaliar alguns aspectos, como: vida útil, confiabilidade, capacidade de armazenamento, custo e impacto ambiental, para determinar qual dispositivo proposto é o mais relevante. Por isso, um dos maiores desafios enfrentados é a fabricação de um dispositivo que consiga combinar alta energia específica, rápido carregamento e alta potência específica com baixo custo de produção. O armazenamento de energia de curto prazo (apenas algumas horas) e o de longo prazo (alguns meses) são essenciais na maioria desses dispositivos (Wang et al., 2020, Najib & Erdem, 2019).

Os dois principais sistemas de armazenamento de energia elétrica, são o supercapacitor (SC) e a bateria, por isso eles têm sido amplamente aplicados em diferentes dispositivos, desde os elétricos portáteis até *smart grids*. Quando comparado a bateria, o supercapacitor é o dispositivo mais promissor já que ele possui alta densidade de potência e longa vida útil (100.000 ciclos) que garante uma rápida velocidade de carga/descarga. No Gráfico de Ragone apresentado na Figura 2, é possível comparar potência específica versus energia específica entre diferentes sistemas de armazenamento de energia (Wang et al., 2020, Xu et al., 2020).

**Figura 2** - Gráfico de Ragone: potência específica em função da energia específica de diferentes dispositivos de conversão e armazenamento de energia.

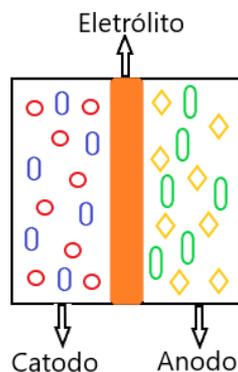


Fonte: Adaptado de Wang et al., 2020.

Cada sistema exposto na Figura 1 apresenta uma região de dominância no gráfico, que é determinado pela densidade de energia e pela potência. Por exemplo, enquanto as baterias possuem alto armazenamento de energia, a sua vida útil é limitada devido a sua baixa potência específica. Já os capacitores possuem baixo armazenamento de energia (energia específica) e alta potência específica. Entretanto, os SCs conseguem ter ao mesmo tempo uma alta densidade de potência, o que proporciona uma capacidade de carga e descarga de energia em segundos e ciclo de vida útil longo (aproximadamente

100.000 ciclos) (Wang et al., 2019, Li et al., 2018). A Figura 3 apresenta uma representação esquemática de um dispositivo eletroquímico genérico, como o supercapacitor.

**Figura 3** - Representação esquemática de um dispositivo eletroquímico genérico.



Fonte: Autores.

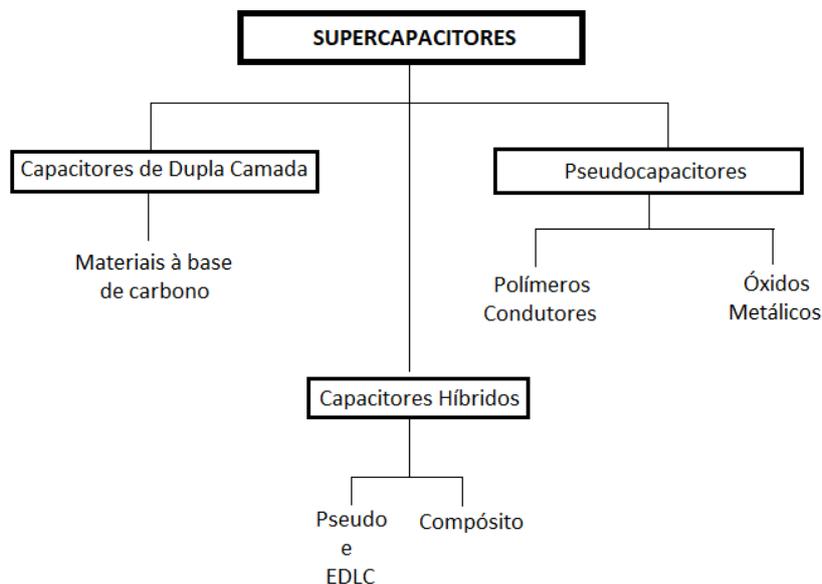
Supercapacitor é um dispositivo eletroquímico composto por um eletrodo do tipo bateria como anodo e um eletrodo do tipo capacitor como catodo, como mostrado na Figura 3. Sua montagem é bastante simples, o que o torna diferente dos demais dispositivos existentes são os materiais que o compõem. Uma das características mais relevantes desse dispositivo é sua área eletroquimicamente ativa maior, quando comparado a sistemas como baterias e capacitores, acarretando uma maior conversão e armazenamento de carga (Yu et al., 2018, Reece et al., 2020). Conseqüentemente, os SC's podem ser usados sozinhos ou em combinação com outro dispositivo de conversão e armazenamento de energia dependendo da demanda da aplicação (Raza et al., 2018).

Existem diversas vantagens do SC em relação aos outros dispositivos, tais como: ausência de requisitos de refrigeração, alta tensão e capacitância. Além disso, possuem alta densidade de energia, ciclos de vida mais longos, menor resistência interna e ampla faixa de temperatura de trabalho (-40°C até 70°C) (Maksound et al., 2021). Porém a que mais chama atenção é a sua capacidade de armazenamento rápido, ou seja, baixo tempo de descarga e maior estabilidade cíclica (Jin et al., 2021).

O desempenho do SC é afetado pelas propriedades eletroquímicas dos materiais que o compõe, da escolha do eletrólito e da janela de potencial. Por isso, para produzir um SC com propriedades otimizadas é necessário que ele possua um intervalo de potencial elevado entre o catodo e o anodo, pois isso irá proporcionar uma maior densidade de energia (Darkwa et al., 2019). Portanto, a combinação adequada do catodo e do anodo é de extrema importância para a fabricação de um SC com uma densidade de energia elevada (Li et al., 2018). Por esse motivo, vários materiais nanoestruturados à base de carbono, polímeros condutores e óxidos metálicos estão sendo implementados para fabricar os mais diversos tipos de SCs (Yin et al., 2020, Kumar et al., 2021).

Os SCs são classificados em duas categorias conforme o mecanismo de conversão e armazenamento de energia. Eles podem ser classificados como capacitores eletroquímicos de dupla camada (EDLC) e pseudocapacitores, de acordo com o mecanismo de armazenamento de carga que possuem e a tecnologia do material usado na fabricação dos eletrodos, como representado na Figura 4 (Wu et al., 2019, Mohanty et al., 2021).

**Figura 4** - Classificação de SC conforme mecanismo de armazenamento de energia.



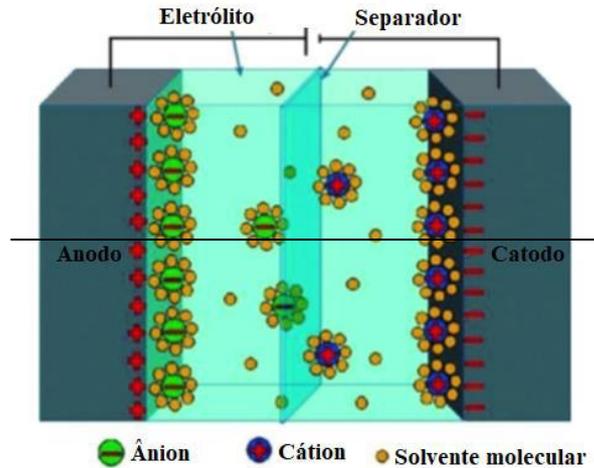
Fonte: Autores.

No EDLC, a carga é armazenada eletrostaticamente devido à adsorção dos íons do eletrólito no eletrodo eletroquimicamente estável. A capacitância de dupla camada ocorre através da separação de carga que acontece devido à polarização na interface eletrodo-eletrólito. Já o armazenamento de carga ocorre através da dupla camada do material do eletrodo sem qualquer transferência de carga através da interface. A deficiência ou excesso de carga na superfície do eletrodo leva à formação de íons de cargas opostas no eletrólito próximo à interface eletrodo-eletrólito para eletroneutralidade. Ela é medida em correspondência com a equação geral de capacitância (Equação 1) (Muzaffar et al., 2019, Jagadale et al., 2019, Parnell et al., 2019).

$$C = \frac{A \times \epsilon_0}{d} \quad (1)$$

onde C é a capacitância em Farads, A é a área eletroquimicamente ativa,  $\epsilon_0$  é a permissividade do espaço livre e d é a dimensão linear da dupla camada elétrica, também conhecida como o comprimento de Debye. O resultado da energia em um EDLC normal depende da atração eletrostática entre os íons no contato do eletrodo e do eletrólito (Muzaffar et al., 2019, Wu et al., 2019, Yu et al., 2019).

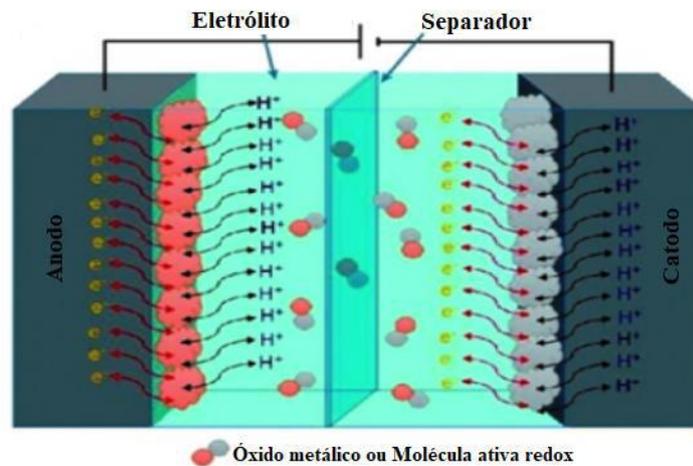
**Figura 5** - Esquema representativo de um supercapacitor do tipo EDLC.



Fonte: (Adaptada de Muzaffar et al., 2019).

A ilustração esquemática de um capacitor EDLC é mostrada na Figura 5. A configuração de um EDLC é simples na qual dois eletrodos são imersos em um eletrólito mantido afastado por um separador (Muzaffar et al., 2019, Wu et al., 2019, Yu et al., 2019).

**Figura 6** - Esquema representativo de um supercapacitor do tipo pseudocapacitor.



Fonte: (Adaptada de Muzaffar et al., 2019).

Já nos pseudocapacitores (PSs), ocorre reações redox faradaicas reversíveis e rápidas para armazenamento de carga e para o aumento da capacitância de um SC. A Figura 6 ilustra, alguns aspectos da montagem de um PS e substâncias eletroquimicamente ativa envolvidas. Processo faradaico ocorre quando há o armazenamento de cargas por meio de um processo que envolve a transferência de cargas eletrostaticamente entre eletrodo e eletrólito. Este processo envolve a passagem de carga através da dupla camada, resultando na passagem de corrente faradaica através da célula do supercapacitor. Este processo faradaico leva a pseudocapacitores com densidades de energia mais altas do que os EDLCs (Sahin et al, 2020).

O EDLC armazena energia eletrostaticamente através da formação de uma dupla camada elétrica na interface material ativo/eletrólito. As duas características necessárias para a formação dessa dupla camada são: alta porosidade e alta área específica. Devido à diferença de potencial entre o eletrodo e o eletrólito, os íons acumulam no eletrólito e na interface

eletro/eletrolito formando uma camada de carga elétrica inversa à acumulada na superfície do eletrodo. Já a energia (E) armazenada de um supercapacitor é calculada através da Equação 2 (Hamsan et al., 2020, Mei et al., 2018, Aziz et al., 2020).

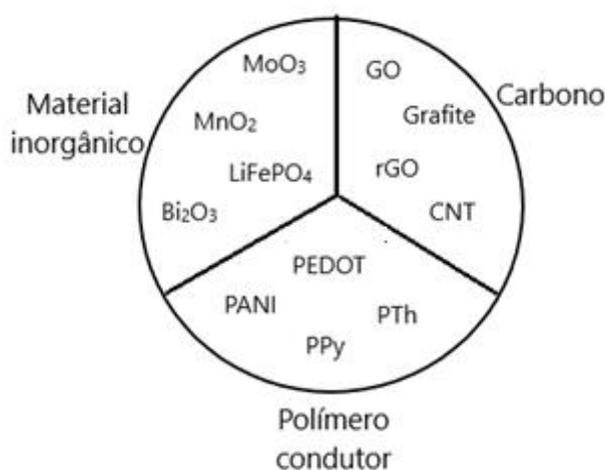
$$E = (1/2) \cdot C \cdot V^2 \quad (2)$$

onde V é a tensão (voltagem) do sistema. Pode-se perceber que a energia armazenada é proporcional à capacitância e ao quadrado da tensão, por isso, ao aumentar esses dois parâmetros, aumenta-se também a densidade de energia no sistema, ocasionando assim uma otimização no SC em que estiver implementado. Já a potência máxima ( $P_{max}$ ) de um SC é dependente da tensão (V) e da resistência interna do sistema - como mostrado na Equação 3 (Karade & Sankapal, 2018, Liu et al., 2020, You et al., 2018).

$$P_{max} = \frac{V^2}{4R} \quad (3)$$

Segundo os autores Askari et al., 2021, Cherusseri et al., 2020 e Chen et al., 2019, o ponto chave para o desenvolvimento de supercapacitores de alta eficiência é o projeto e preparação dos eletrodos que compõem o anodo e o catodo com materiais otimizados para que consigam alcançar um desempenho eletroquímico diferenciado. Na tentativa de fabricar SCs mais eficientes, óxidos metálicos, polímeros intrinsecamente condutores e matrizes porosas à base de carbono (Figura 7) tendem a otimizar o sistema quando implementados simultaneamente. Isso é possível pois cada um dos componentes consegue preservar sua natureza química, sua estrutura cristalina e suas propriedades físicas e eletroquímicas (Askari et al., 2021, Cherusseri et al., 2020, Chen et al., 2019).

**Figura 7** - Diagrama esquemático dos materiais que podem ser implementados nos supercapacitores.



Fonte: Autores.

### 3.1 Óxidos metálicos

O número de publicações descrevendo a síntese de nanomateriais vem crescendo nos últimos anos devido ao interesse na sua implementação em diversas áreas, como na otimização das propriedades dos SACE's (Ketenoglu et al., 2018). A implementação de óxidos metálicos nesses dispositivos está sendo cada vez mais utilizada, uma vez que eles podem apresentar vários estados de oxidação, conseqüentemente, apresentam diversas estruturas que contribuem diretamente para o

armazenamento de carga e possuem reações redox rápidas e eficientes. Logo, a implementação de óxidos metálicos proporciona melhorias nas características finais dos dispositivos como na estabilidade química e no aumento da capacitância específica (Werneck et al., 2018, Wang et al., 2021).

É possível notar que os óxidos metálicos são comumente utilizados como suporte ou material ativo para eletrocatalisadores, em materiais condutores, processos catalíticos e sistemas eletroquímicos. Esses óxidos podem ser sintetizados de diversas formas, como, monocristais, partículas policristalinas ou não cristalinas, sendo que o fator determinante de sua forma e tamanho será a finalidade no sistema que será implementado. Cada óxido possui propriedades (elétricas, ópticas, magnéticas, dentre outras) específicas que, quando combinadas, possibilitam a efetivação destes materiais em diversas tecnologias. Quando as partículas de óxidos metálicos são produzidas em escala nanométrica, possuem propriedades distintas quando comparadas aos materiais com dimensões maiores quimicamente semelhantes, por isso são utilizados como “carga” para vários sistemas. Suas características estão diretamente relacionadas à sua elevada área específica, por isso, quando implementadas adequadamente, propiciam alterações significativas no sistema no qual forem empregadas (Yadav & Devi, 2020, Kumar et al., 2020, Annamalai et al., 2018).

Portanto, a escolha do óxido metálico que será usado como componente na confecção de um SC é de grande importância, uma vez que suas propriedades vão influenciar significativamente nas características finais do dispositivo. Como exemplo, temos os óxidos metálicos que conseguem atuar como “fios eletrônicos”, resultando em uma transferência de elétrons mais eficiente entre os centros redox e os eletrodos (Xia et al., 2018, Kumar et al., 2019, Sun et al., 2018). Apresentar essa característica influencia no aumento da velocidade cinética das reações eletroquímicas e, conseqüentemente, no aumento da capacitância do dispositivo. Isso ocorre, pois, os óxidos, principalmente de metais de transição, são considerados excelentes materiais pseudocapacitivos, ou seja, possuem excelente capacitância teórica e alta atividade eletroquímica (Liu et al., 2019).

Outra característica que vale ressaltar é que a combinação de óxidos com materiais à base de carbono permite manipular as propriedades físicas e químicas do produto. Espera-se que essa combinação aumente a condutividade elétrica e a atividade eletroquímica, além de reduzir o custo do material final do eletrodo. Além disso, é de grande importância melhorar a cinética de transporte de íons e elétrons nos eletrodos e na interface eletrodo-eletrólito, uma vez que isso pode garantir uma quantidade maior de espécies eletroativas exposta na superfície do eletrodo permitindo assim uma reação redox eficiente (Lee et al., 2017).

### 3.2 Matriz porosa à base de carbono

Desde a descoberta dos nanotubos de carbono em 1991, os nanomateriais baseados em carbono mudaram radicalmente a visão da pesquisa em vários ramos da ciência, incluindo os dispositivos de conversão e armazenamento de energia (Arduini et al., 2020). A otimização de materiais de eletrodos à base de carbono com alta área específica e alta condutividade é a chave para o aperfeiçoamento de SC's. Porém sabe-se que as interações  $\pi$  de materiais à base de carbono tornam a área específica e a taxa de difusão de íons menores e conseqüentemente reduz a capacitância específica e a taxa de carga/descarga. Por isso, fez-se necessário a dopagem de materiais de carbono com heteroátomos (N, S, Bi, Mo, P, etc.) para assim conseguir melhorar efetivamente as propriedades eletrônicas e a reatividade do material e conseqüentemente, melhorando significativamente o desempenho eletroquímico do material final (Li et al., 2021, Liu et al., 2021).

Os materiais à base de carbono podem ser considerados como os mais versáteis existentes, em termos da relação estrutura/propriedades, uma vez que eles apresentam propriedades as quais estão diretamente ligadas ao tipo de arranjo espacial dos átomos e sua hibridização. Além disso, nanomateriais à base de carbono possuem propriedades mecânicas e elétricas como, alta relação superfície-volume, baixa resistência à transferência de elétrons e alta condutividade térmica, o que os tornam otimizados para aplicação em diversas áreas (Down et al., 2018, Fan et al., 2018).

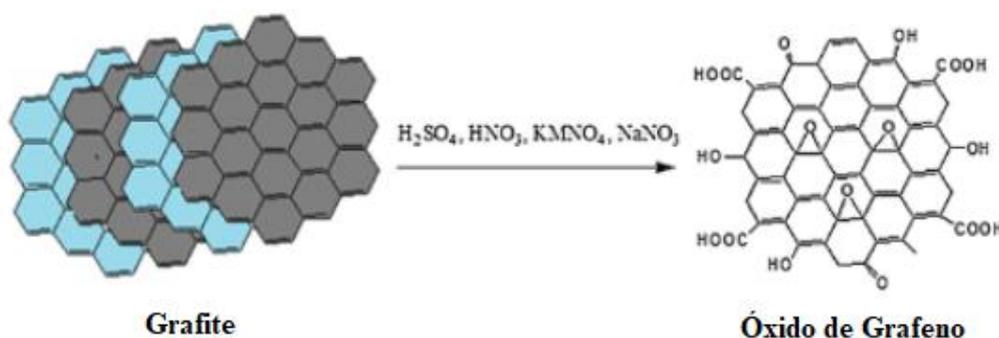
O grafite é uma das formas alotrópicas do carbono que ganhou mais espaço no meio científico, devido a sua alta capacidade específica, baixo potencial de operação, curva de descarga constante etc. Além disso, ele possui a capacidade de hospedar uma variedade de intercalantes o que o torna um “eletrodo versátil” quando comparado a outros materiais à base de carbono. Na estrutura do grafite encontra-se forte ligação covalente dentro dos planos, porém tem-se ligação fraca na direção vertical, o que resulta em um espaçamento entre as camadas e consequentemente na capacidade de intercalação dos íons (Li et al., 2019, Cai et al., 2020).

É por esse motivo que ele possui diversas características que são de grande interesse para a indústria e para a pesquisa, como: propriedades térmicas, elétricas e lubrificantes, o que torna sua aplicabilidade bastante versátil. Portanto, a escolha do grafite para eletrodos é bem justificada devido à sua alta estabilidade e desempenho a longo prazo (Li et al., 2019, Lou et al., 2020).

O óxido de grafeno (GO) possui propriedades químicas diferenciadas quando comparadas a outras estruturas de carbono. Devido a essas propriedades, ele está sendo cada vez mais estudado e implementado na área de eletroquímica, principalmente por possuir boa condutividade elétrica, grande área superficial e baixo custo de produção. Assim, tem sido usado como material para a construção de eletrodos cada vez mais eficientes, especialmente na área de energia (Silva et al., 2020, Pimenta et al., 2019).

A maneira mais simples e rápida de obter o GO é através da esfoliação mecânica do grafite, porém esse método possui um rendimento muito baixo. Outro método descrito na literatura é o da deposição química em fase vapor, onde tem-se o crescimento de monocamadas de GO com baixíssimas alterações e defeitos entre elas. Contudo, é um método de elevado custo de produção e de pouco controle em relação à área superficial resultante. O terceiro método, e o mais utilizado é o método de Hummers, isso ocorre por ser adequado para produção em grande escala de GO (Yu et al., 2020, Ikram et al., 2020).

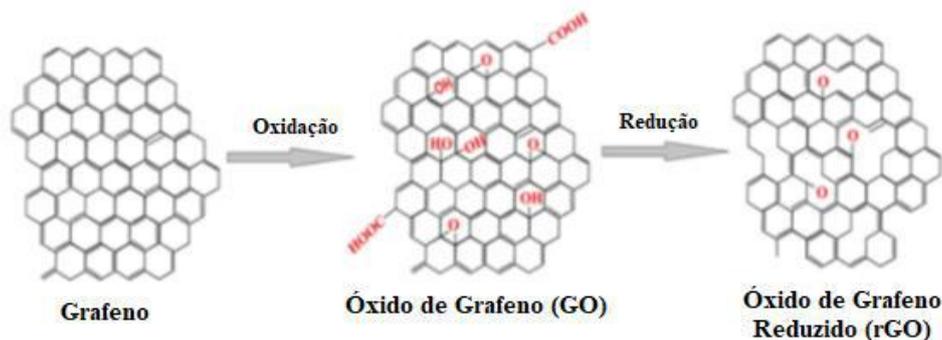
**Figura 8** - Oxidação do grafite em óxido de grafeno.



Fonte: Adaptada de Ikram et al., (2020).

Na Figura 8 encontra-se representado o processo de oxidação do grafite através de diferentes reagentes em um GO de camada única (Ikram et al., 2020). Já a Figura 9, consiste na oxidação do grafite até o GO e, em seguida, na redução deste até a produção do óxido de grafeno reduzido (rGO). É importante salientar que as folhas de GO são compostas por grupos carbonila e ácidos carboxílicos em suas bordas, e grupos hidroxila e epóxi em seu plano basal. Durante o processo de oxidação, há a perda de algumas propriedades condutoras do material devido à formação de alguns defeitos estruturais. Já no processo de redução que o GO sofre para transformar-se em rGO, pode haver diferentes graus de redução, o que resulta em diferentes propriedades no material obtido (Farjadian et al., 2020, Kavitha, 2020).

**Figura 9** - Representação esquemática do método de Hummers.



Fonte: Adaptada de Kavitha, 2020.

O óxido de grafeno reduzido (rGO) é constantemente obtido através das seguintes rotas: redução térmica e redução química, sendo que na segunda são empregados agentes redutores, como a hidrazina e o ácido ascórbico. Esses dois métodos resultam em rGO com propriedades estruturais e eletrônicas similares, porém quando a via térmica é utilizada não há necessidade de realizar etapas de purificação, uma vez que o agente redutor é a variação da temperatura, o que o torna mais eficiente e barato (Xu et al., 2018).

Por via térmica, o GO é aquecido rapidamente em atmosfera inerte, ocasionando a liberação de água, CO e CO<sub>2</sub>, o que força a separação de suas folhas por causa da pressão gerada no interior das camadas empilhadas. Após a separação, é gerado o rGO, com alta área superficial específica, baixa densidade e com folhas altamente enrugadas. Já na redução química, um agente redutor é colocado em uma dispersão estável de GO para que ocorra a remoção dos grupos oxigenados das folhas e, assim, resultando na produção do rGO (Vul & Dideikin, 2018, Adetayo & Runsewe, 2019).

### 3.3 Polímeros Condutores

Os polímeros condutores (PC) compõem uma classe de macromoléculas diversificada e com propriedades que variam dependendo da estrutura molecular, bem como de outras características que tornam seu uso amplo. Eles também são conhecidos como polímeros conjugados já que sua cadeia consiste em ligações simples e duplas alternadas, responsáveis por seu comportamento elétrico e óptico. Os PC's mais conhecidos são poliacetileno (PA), polianilina (PANI), polipirrol (PPy), politiofeno (PTH), poli(para-fenileno) (PPP), poli(-fenilenovinileno) (PPV) e polifurano (PF). A solubilidade e a processabilidade de PC's estão diretamente ligadas a presença de cadeias laterais, já as propriedades mecânicas, ópticas e elétricas estão ligadas aos íons dopantes ligados ao polímero (Namsheer & Rout, 2021).

A IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) define polímero como “uma substância composta de moléculas, caracterizada pela repetição múltipla de uma ou mais espécies de átomos ou grupos de átomos (unidades constitucionais) ligados entre si em quantidades suficientes para fornecer um conjunto de propriedades que não variam acentuadamente com a adição ou remoção de uma ou algumas das unidades constitucionais (baseado em estrutura)” (IUPAC, 1974).

Os polímeros apresentam propriedades únicas como, flexibilidade, resistência a impacto, baixa densidade e baixa temperatura de processamento. De modo geral, os polímeros são divididos entre dois grandes grupos: sintéticos e naturais, sendo o primeiro produzido artificialmente, como o PPy, a PANI e o PTH, e o segundo por organismos vivos, como a celulose, a seda e a lã. Outra forma de caracterizar os polímeros é através da condutividade, como condutores ou isolantes. Os polímeros

condutores podem ser classificados como extrínsecos e intrínsecos. Nos extrínsecos, ocorre condução de corrente elétrica a partir da adição de cargas. Já os intrínsecos conseguem conduzir corrente elétrica sem a incorporação dessas cargas. Eles são formados por cadeias hidrocarbônicas (contendo ou não heteroátomos), e possuem a característica de passarem de isolantes a condutores através da oxidação ou redução da cadeia polimérica inicial (Lee & Chang, 2019, Eskandari et al., 2020).

Polímeros condutores derivados de monômeros como pirrol, anilina e tiofeno possuem propriedades otimizadas quando comparados a outros polímeros, como boa eletroatividade e química favorável em relação à dopagem e desdopagem. Por isso, são viáveis para a implementação em sistemas de dispositivos híbridos. Esses polímeros apresentam vantagem em relação a outros materiais à base de carbono por conseguirem se adaptar a processos de oxidação e redução (Zare et al., 2020).

Sabe-se que uma das mais promissoras formas de obtenção de polímeros com condutividade elevada consiste no encapsulamento das cadeias poliméricas no interior dos espaços vazios de estruturas hospedeiras como poros, lamelas e cavidades, através da polimerização *in situ* no interior desses espaços. Assim, é possível controlar o tempo de polimerização e, também, a estrutura do polímero resultante, como tubos, lamelas, filamentos, filmes ou pó (Zhang et al., 2018b).

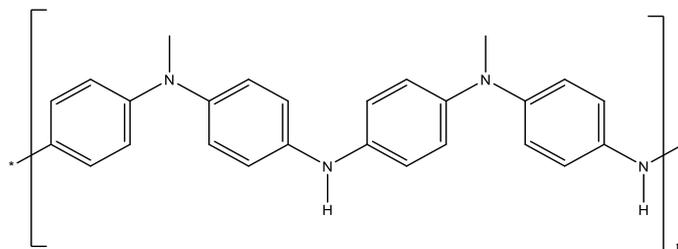
O critério principal e até mesmo definitivo na escolha de polímeros condutores, para a maior parte das aplicações tecnológicas, são as suas propriedades de oxidação e redução. Aqueles com baixo potencial de oxidação apresentam possibilidade de remoção ou adição de elétrons  $\pi$ , formando, inicialmente, íons poliméricos com estabilidade suficiente para originarem as macromoléculas (Jha et al., 2018). Cabe ressaltar que os compósitos que possuem polímero condutor em sua estrutura têm propriedades mecânicas, estabilidade química e propriedades elétricas aprimoradas sob diferentes temperaturas (Sanjay et al., 2018, Aziz et al., 2018).

### 3.3.1 Polianilina

A polianilina (PANI), em seu estado condutor, apresenta diversas características, como estabilidade química, facilidade de dopagem e baixo custo, que são aspectos importantes para aplicações tecnológicas. Uma das características que mais se destaca neste polímero condutor é o fato de ser dopado sem alteração no número de elétrons associados à cadeia polimérica (Liao et al., 2019, Jha et al., 2018).

Geralmente, a PANI é produzida em uma fase sólida verde escura com polimerização oxidativa em meio aquoso ácido. Diferentes ácidos são usados como dopantes na síntese da PANI, englobando ácidos orgânicos e inorgânicos. Os ácidos orgânicos, sulfônicos ou carboxílicos, são mais utilizados quando comparados aos inorgânicos pois produzem uma PANI mais estável, solúvel e condutora (Jangid et al., 2020, Karaoglan & Bindal, 2018).

**Figura 10** - Fórmula estrutural da PANI na forma neutra.



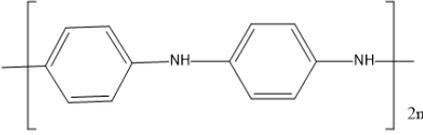
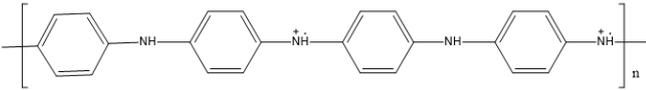
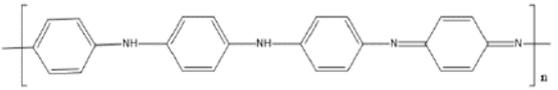
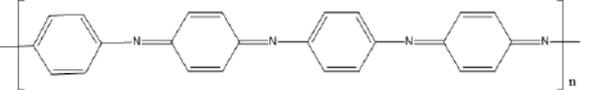
Fonte: Autores.

A fórmula estrutural da polianilina está representada na Figura 10. A síntese da polianilina pode resultar em um material em pó ou como filmes. Independentemente disso, a produção desse polímero é considerada viável economicamente

uma vez que sua síntese e dopagem possui um baixo custo e é considerada fácil (Bhadra et al., 2020, Huang et al., 2018, Shoaie et al., 2019).

A síntese convencional pode produzir um polímero com alta massa molecular e pureza elevada, ou pode produzir um polímero já dopado e em grandes quantidades. Já na síntese eletroquímica, o produto é obtido sob a forma de filmes, fazendo com que não seja necessária a utilização de agentes oxidantes ou catalisador (Bhadra et al., 2020, Huang et al., 2018, Shoaie et al., 2019). No Quadro 2 encontra-se representados os graus de oxidação da PANI e suas estruturas.

**Quadro 2** - Diferentes estruturas da PANI em diferentes estados de oxidação.

Nome comum realacionado ao estado de oxidação	Características	
Leucoesmeraldina	Cor	Amarela
	Condutividade	Isolante, completamente reduzida
	Estrutura	
Sal de esmeraldina	Cor	Verde
	Condutividade	Condutora, completamente oxidada
	Estrutura	
Base esmeraldina	Cor	Azul
	Condutividade	Isolante, parcialmente oxidada
	Estrutura	
Permigranilina	Cor	Púrpura
	Condutividade	Isolante, completamente oxidada
	Estrutura	

Fonte: Adaptada de Huang et al., (2018), Bhadra et al., (2020), Shoaie et al., (2019), Kazemi et al., (2020), Gu et al., (2018).

Existem diferentes graus de oxidação da PANI resultando nas estruturas leucoesmeraldina, protoesmeraldina, esmeraldina, nigranilina e a pernigranilina. Esses diferentes estados de oxidação implicam em diferentes características, como coloração, condutividade e capacitância (Huang et al., 2018, Kazemi et al., 2020, Gu et al., 2018).

### 3.3.2 Politiofeno

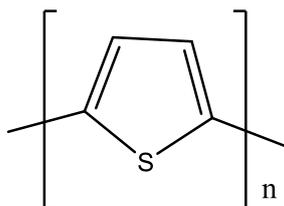
Outro polímero que está sendo cada vez mais implementado na fabricação de dispositivos de conversão e armazenamento de energia, dada sua condutividade, estabilidade e propriedades eletroquímica otimizadas, é o politiofeno (PTH). Além dessas propriedades, esse polímero possui propriedades ópticas que fazem com que o interesse nele aumente ainda mais quando comparado à outros polímeros condutores (Mousavi et al., 2021, Hong et al., 2020).

Esse polímero é formado por cadeias de anéis tiofênicos, com ligações  $\pi$ -conjugadas. Existem várias maneiras de sintetizar o PTH, como métodos químicos e eletroquímicos. Porém, o mais utilizado é o de oxidação química devido ao seu alto rendimento. A combinação do PTH com partículas metálicas em escala nanométrica pode superar as deficiências desse

polímero puro, fazendo com que as propriedades dos materiais compósitos, como estabilidade, processabilidade, propriedades mecânicas e elétricas, sejam otimizadas (Al-Refai et al., 2021).

Com o auxílio dos métodos de copolimerização e derivações estruturais, é possível alterar a estrutura molecular do politiofeno. Além disso, quando esse polímero está funcionalizado é possível ainda ter propriedades ópticas e fotoluminescente, por isso, é possível notar a presença desse polímero em LEDs (diodos emissores de luz), células solares orgânicas e sensores químicos (Peng & Han, 2020). A Figura 11 ilustra a estrutura química do politiofeno.

**Figura 11** - Fórmula estrutural do PTH na forma neutra.

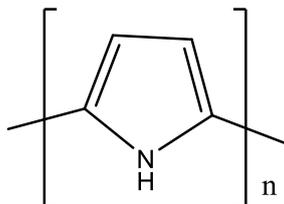


Fonte: Autores.

### 3.3.3 Polipirrol

O polipirrol (PPy) é amplamente estudado e implementado em diversas aplicações como supercapacitores/eletrodos, sensores de gás, biossensores, roupas de proteção, revestimento anticorrosivo, entre outras, uma vez que possui elevada estabilidade química e ambiental e uma alta condutividade elétrica. A Figura 12 apresenta a estrutura do PPy (Pang et al., 2020, Ashassi-Sorkhabi & Kazempour, 2020).

**Figura 12** - Fórmula estrutural do PPy na forma neutra.

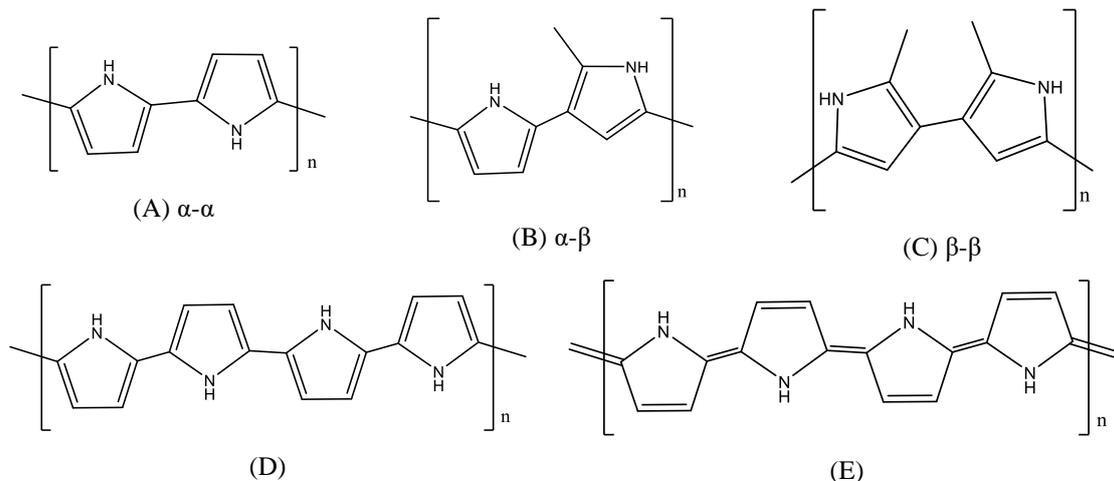


Fonte: Autores.

Os monômeros nas cadeias de PPy são majoritariamente ligados nas posições  $\alpha$ - $\alpha$  (Figura 13A), porém, é possível perceber uma quantidade pequena de monômeros ligados nas posições  $\alpha$ - $\beta$  e  $\beta$ - $\beta$  (Figura 13B,C). O PPy é condutor devido à alternância de ligações simples e duplas, que levam a um deslocamento da densidade eletrônica na molécula, entretanto no estado neutro (não dopado) ele é isolante (Pang et al., 2020, Ashassi-Sorkhabi & Kazempour, 2020).

A dopagem química ou eletroquímica é usada para aumentar a condutividade do PPy. Durante o processo de dopagem, o polímero sofre oxidação e perde um elétron da cadeia neutra, o que acarreta na alteração de sua estrutura aromática para a forma quinoide (Figura 13D,E). Assim, a condução do polímero nesse estado dá-se *via* pólarons e bipólarons (Pang et al., 2020, Stejskal & Trhová, 2018, Ashassi-Sorkhabi & Kazempour, 2020, Wang et al., 2022).

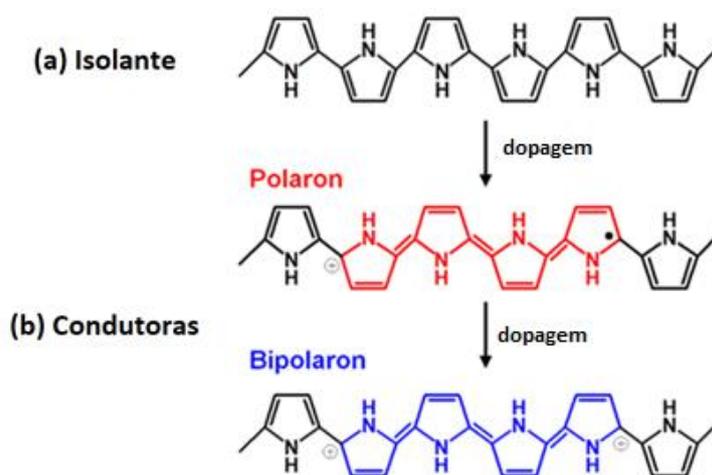
**Figura 13** - (A-C) Possíveis monômeros para o PPy, (D) Forma benzenoide do PPy, (E) Forma quinoides do PPy.



Fonte: Autores.

Para que o polipirrol esteja na forma condutora é necessário que sofra oxidação ou redução do sistema conjugado. A Figura 14 mostra esse processo de oxidação e redução e suas respectivas estruturas. É possível notar que quando o polímero perde um elétron, forma-se um polaron (Figura 13A), e quando um segundo elétron é oxidado forma-se um bipolaron duplamente carregado (Figura 13B). (Pang et al., 2020, Wang et al., 2018, Wang et al., 2022).

**Figura 14** - Representação esquemática das estruturas químicas do PPy: (a) polímero neutro (forma aromática) e (b) polarons e bipolarons (forma quinoides), adaptada.



Fonte: Adaptada de Wang et al., (2018).

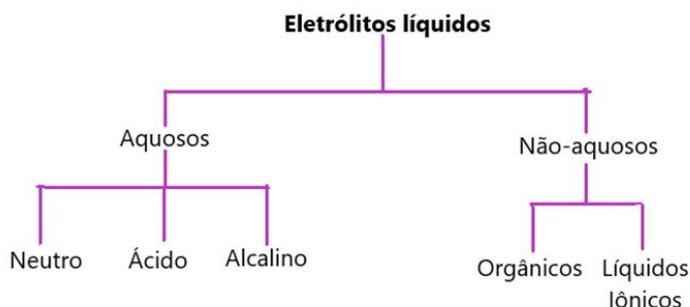
### 3.4 Eletrólitos para Supercapacitor

O desempenho de um SC está diretamente ligado ao material que compõe o eletrodo e o eletrólito que será empregado no sistema, porém o eletrólito influencia em três aspectos que são determinantes para o seu desempenho, a resistência equivalente (ESR - *Equivalent Series Resistance*), a energia específica e a potência do dispositivo, já que a diferença de potencial aplicada à célula é estabelecida pela janela eletroquímica do eletrólito (faixa em que não ocorre reações químicas de decomposição) (Hu & Lu, 2020).

Os eletrólitos geralmente são divididos em aquoso, orgânico, líquido iônico e sólido ou quase-sólido e são definidos

como soluções condutoras iônicas uma vez que, eles além de promoverem a dissolução do meio ainda possuem a capacidade de promover a ionização do soluto em determinados solventes, como mostrado abaixo na Figura 15 (Ye et al., 2020, Leonard et al., 2018).

**Figura 15** - Classes de eletrólitos líquidos para SC.



Fonte: Autores.

Os eletrólitos aquosos apresentam alta condutividade iônica, baixa resistência e facilidade em permear através dos microporos e são implementados principalmente em dispositivos que envolvem reações eletroquímicas com pseudocapacitores e EDLCs. Essas soluções aquosas podem ser ácidas, neutras e alcalinas, sendo as soluções de  $H_2SO_4$  e  $KOH$  as mais utilizadas. Como desvantagem temos a volatilidade e a estreita janela de potencial eletroquímico que influenciam diretamente na alteração da densidade de energia. Já o eletrólito orgânico é composto por um solvente orgânico e um eletrólito de suporte. Suas principais características são baixa volatilidade, boa estabilidade eletroquímica e grande constante dielétrica. E o principal objetivo na sua utilização é alcançar a proporção ideal entre diferentes solventes orgânicos para combinar com o eletrólito de suporte e os materiais do eletrodo (Pazhamalai et al., 2018, Lee et al., 2019).

Líquido iônicos têm sido amplamente implementados em SCs, principalmente no EDLC, por possuírem uma ampla janela eletroquímica, condutividade e mobilidade iônica relativamente alta, baixa volatilização e toxicidade. Os SC's que usam com esse tipo de eletrólito têm boa estabilidade e durabilidade, e alta tensão de trabalho, apesar da alta viscosidade e baixa capacitância específica, quando comparado com outros tipos, como os aquosos. Outro fator que influencia diretamente a condutividade e viscosidade dos líquidos iônicos é a temperatura, por isso dispositivos que utilizam esse tipo de eletrólito são mais sensíveis a alteração de temperatura (Yu & Manthiram, 2018, Yu & Chen, 2019).

Os eletrólitos sólidos apresentam boa estabilidade química, alta energia específica e alta tensão de trabalho, o que possibilita o desenvolvimento de dispositivos miniaturizados e finos. No entanto, a aplicação prática desse tipo ainda enfrenta muitos desafios já que a maioria dos eletrólitos poliméricos à temperatura ambiente possuem baixa condutividade, mau contato entre eletrodo/eletrólito e baixa solubilidade dos sais eletrolíticos no polímero. Entre vários tipos de eletrólitos sólidos os de hidrogel são considerados ecologicamente corretos, amplo potencial de aplicações, alta condutividade, e são do tipo alcalino (Willfahrt et al., 2019, Reece et al., 2018, Lu & Chen, 2020).

Em resumo, cada tipo de eletrólito possui suas próprias vantagens e desvantagens, e é difícil para um único tipo atender as crescentes demanda dos dispositivos de conversão e armazenamento de energia, como os SCs. Por isso, novos tipos de eletrólitos híbridos estão surgindo como candidatas promissoras para aplicações nesses dispositivos (Ye et al., 2020).

#### 4. Supercapacitor vs. Bateria

Baterias e supercapacitores são sistemas de conversão e armazenamento de energia que compartilham uma estrutura semelhante – ambos convertem e armazenam energia eletroquímica através da difusão e migração de íons, além das reações redox de espécies adsorvidas nos eletrodos. Eles são compostos de eletrodos positivos e negativos separados por um eletrólito que permite a transferência de íons. Entretanto, vale ressaltar que cada sistema (bateria ou supercapacitor) possui características e recursos específicos que serão determinantes para cada aplicação que serão implementados. Por exemplo, as baterias são usadas principalmente em sistemas que o custo, o tempo de carga/descarga e a densidade de energia são cruciais, e os supercapacitores são preferidos em dispositivos que exigem alta densidade de potência e longa vida útil. No Quadro 3 foram dispostas algumas diferenças importantes entre eles (Xie et al., 2018, Das & Mandal, 2018, Zou et al., 2018).

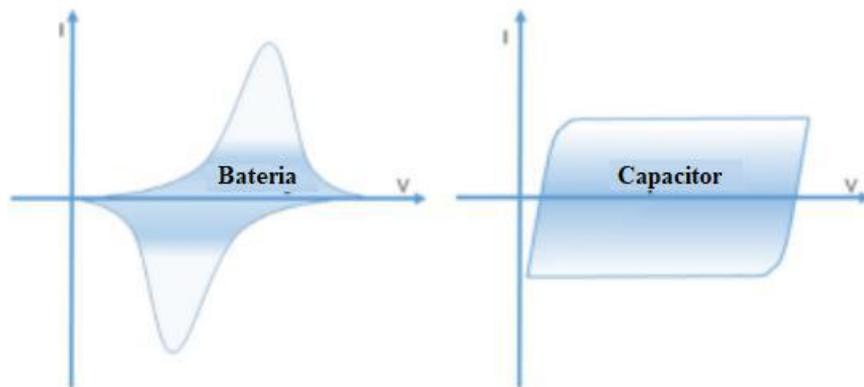
**Quadro 3 - Supercapacitor vs. bateria de lítio, adaptada.**

<b>Função</b>	<b>Supercapacitor</b>	<b>Bateria de lítio</b>
Tempo de carregamento	1 a 10 segundos	10 a 60 minutos
Ciclo de vida	10 a 15 anos	5 a 10 anos
Voltagem	2,3 a 2,75V	3,6V (nominal)
Energia específica	5 Wh/kg	120 a 240 Wh/kg
Potência específica	Até 10.000 W/kg	1.000 a 3.000 W/kg
Custo por kW/h	Aproximadamente \$10.000	\$250 a \$1.000
Temperatura de carga	-40 a 65°C	0 a 45°C
Temperatura de descarga	-40 a 65°C	-20 a 60°C
Eficiência	85 a 98%	70 a 85%

Fonte: Adaptada de Xie et al., 2018, Das & Mandal, 2018, Zou et al., 2018.

Ao longo do tempo de uso, tanto as baterias quanto os capacitores tendem a perder desempenho em consequência dos materiais eletroativos, da estabilidade da corrente, da sobrecarga e das especificações da aplicação. Apesar dos avanços que foram feitos para aprimorar o desempenho da bateria, até recentemente não foi possível solucionar o principal problema resultante do pico de uso, ou seja, o maior dano ocorre com o uso repentino da energia da bateria. Já os supercapacitores, mesmo sendo semelhantes em relação ao armazenamento de energia, destacam-se por possuírem alta capacidade de carga/descarga e resposta elétrica semelhante à dos capacitores clássicos, porém sua capacitância específica é muito maior (Kouchachvili et al., 2018, Salameh et al., 2020). As diferenças entre o comportamento de carga/descarga desses dois dispositivos podem ser vista nos gráficos de voltametria cíclica apresentados na Figura 16 (Xu et al., 2020, Kouchachvili et al., 2018, Yi et al., 2021).

**Figura 16** - Voltamogramas típicos de bateria e capacitor.

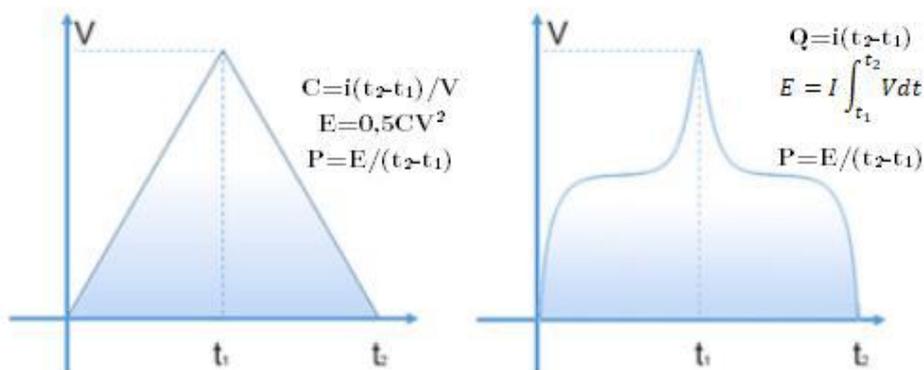


Fonte: Adaptada de Xu et al., (2020).

A partir da Figura 16, nota-se que no voltamograma da bateria estão presentes os picos redox, mostrando o potencial necessário para as reações e que a carga e descarga estão associadas às reações redox Faradaicas. Percebe-se também que as mudanças de fase geralmente ocorrem devido à entrada e saída dos íons nos materiais dos eletrodos. No entanto, o voltamograma correspondente ao supercapacitor não apresenta picos redox. Uma vez que os eletrodos foram aplicados com potenciais, os íons presente no eletrólito, são imediatamente adsorvidos aos eletrodos fazendo com que a energia elétrica fique armazenada. Lembrando que os íons são adsorvidos apenas na superfície do eletrodo e não há reações ocorrendo durante a carga/descarga, por isso não há picos redox (Xu et al., 2020, Kouchachvili et al., 2018, Yi et al., 2021).

Os processos de conversão e armazenamento de energia das baterias e dos supercapacitores atribuem comportamentos de carga/descarga bastante diferentes de seus materiais de eletrodo. A Figura 17 ilustra os gráficos de carga/descarga galvanostática, onde o supercapacitor exibe uma forma triangular e a supercapacitância pode ser calculada, e as baterias, exibem plataformas claras de carga/descarga. Além disso, pode-se calcular as densidades de energia e de potência com base nas equações apresentadas (Xu et al., 2020, Mehtab et al., 2019).

**Figura 17** - Voltamogramas típicos de supercapacitor e bateria baseado na capacitância específica (C), energia específica (E) e potência específica (P).



Fonte: Adaptada de Xu et al., (2020).

## 5. Aplicações do Supercapacitor

A implementação de um supercapacitor é adequada quando se faz necessária uma carga rápida para suprir uma demanda energética de curto prazo, em contrapartida a bateria é utilizada quando a demanda energética for a longo prazo. Por isso, os SC's são mais eficientes no preenchimento das lacunas energéticas que duram de alguns segundos a minutos e podem ser recarregados rapidamente (Cossuta et al., 2020, Saha et al., 2018). Os SC's podem ser implementados como fonte de energia secundária, ou seja, como dispositivos de segurança caso haja interrupção de energia de alimentação em computadores com o intuito de preservar os dados da memória RAM. Já em celulares são usados para armazenar dados na memória quando a bateria é alterada. Também podem ser usados para alimentar memórias *backup*, em câmeras, impressoras, projetores, entre outros (Raza et al., 2018, Li & Wei, 2013).

Em aplicações industriais, eles são empregados na conservação e preservação da potência quando ocorre picos e perdas de energia de curta duração. Também são usados em plantas de energia solar e eólica para armazenar ou liberar energia com o intuito de suprir a inconstância da eletricidade gerada por esses tipos de fontes de energia renováveis. Já em veículos elétricos e híbridos, esses dispositivos geralmente são utilizados juntamente com baterias, com o intuito de fornecer alta potência durante a aceleração e recuperar a energia gerada durante a frenagem (Raza et al., 2018, Li & Wei, 2013).

Como exemplo prático temos em Nova York, a empresa responsável pela Long Island Rail Road (LIRR), está testando o uso do SC como sistema de energia para os volantes de seus trens. Essa ideia surgiu, na tentativa de evitar quedas de tensão durante a aceleração de um trem e reduzir o pico de uso de energia, por isso um banco de supercapacitor de 2 MW está sendo testado contra volantes que fornecem 2,5 MW de potência. Ambos os sistemas devem fornecer energia contínua por 30 segundos em sua respectiva capacidade de megawatt e recarregar totalmente ao mesmo tempo. O objetivo é alcançar uma variação na tensão nominal de no máximo 10%, ter baixa manutenção e um ciclo de vida de aproximadamente 20 anos (Wang et al., 2020, Sundriyal et al., 2018).

Já no Japão, sistemas de SC's de 4 MW são instalados em edifícios comerciais para reduzir o consumo da rede nos horários de pico e facilitar o carregamento. Além disso, também estão sendo implementados para iniciar *backup's* durante quedas de energia e fornecer energia até que a situação seja estabilizada. Outra aplicação é o uso de SC's em *powertrains* (trens elétricos), uma vez que existe a possibilidade de carregamento ultrarrápido durante a frenagem regenerativa e a entrega de alta corrente na aceleração tornando-o ideal como intensificador de carga de pico para veículos híbridos (Wang et al., 2020, Sundriyal et al., 2018).

## 6. Considerações Finais

No presente artigo de revisão, foram apresentados diferentes materiais que podem ser implementados como materiais de eletrodo e eletrólito, apontando suas características quando utilizados em supercapacitores. Foi observado que, conseguir uma boa combinação entre o eletrodo e o eletrólito é de grande importância para obter bons resultados de capacitância e co isso, maximizar o desempenho do SC. Para escolher o material mais adequado para a confecção do supercapacitor, primeiramente deve-se determinar sua aplicação final. Depois disso, também deve ser considerado o ciclo de vida, a energia específica, a potência específica, a densidade de energia, a densidade de potência e a vida útil.

Além dos materiais, determinar a configuração da célula, o processamento dos eletrodos e a montagem da célula são cruciais para a otimização do projeto final e, conseqüentemente maximizar o desempenho final do SC.

A tecnologia de SC's pode ser implementada em diferentes áreas e em diversas aplicações. As principais características que vão determinar a qualidade dessa SC são: manutenção da densidade de energia, eficiência em uma ampla faixa de temperatura, preservação da densidade de potência, vida útil longa, durabilidade e confiabilidade. Porém,

pesquisadores ainda buscam fabricar dispositivos que atendam às necessidades tecnológicas para viabilizar sua produção e utilização em larga escala.

É possível notar que ainda existe uma resistência quanto ao uso do supercapacitor, uma vez que, eles normalmente são usados de forma complementar às baterias, por isso fabricar um SC que consiga trabalhar de forma isolada e com propriedades otimizadas é de grande importância para a ciência e para a tecnologia.

A partir do que foi apresentado e discutido, sugere-se que em estudos futuros sejam implementados diferentes tipos de nanocompósitos em sistemas voltados para a área de energia. Em particular, acredita-se que maiores esforços deveriam ser direcionados para síntese e avaliação de novos óxidos metálicos. Em paralelo, pesquisas com novos polímeros condutores, como o PEDOT (Poli(3,4 etilenodioxitiofeno), e novas formas de carbono também devem continuar sendo conduzidas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (IHWRS) pelo apoio financeiro.

## Referências

- Adetayo, A., & Runsewe, D. (2019). Synthesis and Fabrication of Graphene and Graphene Oxide: A Review. *Open Journal of Composite Materials*, 9, 207-229.
- Al-Refai, H. H., Ganash, A. A., & Hussein, M. A. (2021). Polythiophene and its derivatives – Based nanocomposites in electrochemical sensing: A mini review. *Materials Today Communications*, 26, 101935(1-11).
- Alves, M. R., Rodrigues, V. D., Soares, W. D., & Junior, R. S. M. (2022). Revisão da literatura e suas diferentes características. *Editora Científica Digitas*, 4, 46-53, 10.37885/220509058.
- Annamalai, K. P., Zheng, X., Gao, J., Chen, T., & Tao, Y. (2018). Nanoporous Ru-Mn oxide nanoparticles/reduced graphene oxide for high-energy symmetric supercapacitors. *Carbon*, 144, 185-192.
- Arduini, F., Cinti, S., Mazzarazhio, V., Scognamiglio, V., Amine, A., & Moscone, D. (2020). Carbon black as an outstanding and affordable nanomaterial for electrochemical (bio)sensor design. *Biosensors & Bioelectronics*, 20, 1-52.
- Ashassi-Sorhabi, H., & Kazempour, A. (2020). Incorporation of organic/inorganic materials into polypyrrole matrix to reinforce its anticorrosive properties for the protection of steel alloys: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 309, 113085(1-14).
- Askari, M. B., Salarizadeh, P., Seifi, M., Zadeh, M. H. R., & Bartolomeo, A. D. (2021). ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanorods on reduced graphene oxide as advanced supercapacitor electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 860, 158497.
- Aziz, S. B., Woo, T. J., Kadir, M. F. Z., & Ahmed, H. M. (2018). A conceptual review on polymer electrolytes and ion transport models. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 3, 1-17.
- Aziz, S. B., Hamsan, M. H., Abdullah, R. M., Abdulwahid, R. T., Brza, M. A., Marif, A. S., & Kadir, M. F. Z. (2020). Protonic EDLC cell based on chitosan (CS): methylcellulose (MC) solid polymer blend electrolytes. *Ionics*, 26, 1829-1840.
- Bhadra, J., Alkareem, A., & Al-Thani, N. (2020). A review of advances in the preparation and application of polyaniline based thermoset blends and composites. *Journal of Polymer Research*, 27(122), 1-20.
- Cai, W., Yao, Y. X., Zhu, G. L., Yan, C., Jiang, L. L., He, C., Huang, J. Q., & Zhang, Q. (2019). A review on energy chemistry of fast-charging anodes. *Chemical Society Reviews*, 49(12), 3806-3833.
- Chen, C. R., Qin, H., Cong, H. P., & Yu, S. H. (2019). A highly stretchable and real-time healable supercapacitor. *Advanced Materials*, 31, 1900573-1900583.
- Cherusseri, J., Pandey, D., Kumar, K. S., Thomas, J., & Zhai, L. (2020). Flexible Supercapacitor Electrodes using Metal-Organic Frameworks. *Nanoscale*, doi: 10.1039/D0NR03549A.
- Cossutta, M., Vretenar, V., Centeno, T. A., Kotrusz, P., McKechnie, J., & Pickering, S. J. (2020). A comparative life cycle assessment of graphene and activated carbon in a supercapacitor application. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118468(1-10).
- Darkwa, K. M., Zequine, C., Kahol, P. K., & Gupta, R. K. (2019). Supercapacitor energy storage device using biowastes: a sustainable approach to green energy. *Sustainability*, 11(414), 1-22.
- Das, M., & Mandal, R. (2018). A comparative performance analytics of direct, with battery, supercapacitor, and battery-supercapacitor enabled photovoltaic water pumping systems using centrifugal pump. *Solar Energy*, 171, 302-309.
- Down, M. P., Rowley-Neale, S. J., Smith, G. C., & Banks, C. E. (2018). Fabrication of graphene oxide supercapacitor devices. *ACS Applied Energy Materials*, 1, 707-714.

- Eskandaria, E., Kosarib, M., Farahania, M. H. D. A., Khiavic, N. D., Saedikhanid, M., Katala, R., & Zarinejadf, M. (2020). A review on polyaniline-based materials applications in heavy metals removal and catalytic processes. *Separation and Purification Technology*, 231(115901), 1-27.
- Fan, L., Lin, K., Wang, J., Ma, R., & Lu, B. (2018). A nonaqueous potassium-based battery-supercapacitor hybrid device. *Advanced Materials*, 30(1800804), 1-7.
- Farjadian, F., Abbaspour, S., Sadatlu, M. A. A., Mirkiani, S., Ghasemi, A., Hoiseini-Ghahfarokhi, M., Mozaffari, N., Karimi, M., & Hamblin, M. R. (2020). Recent Developments in Graphene Oxide: Properties, Synthesis, and Modifications: A review. *Chemistry Select*, 5, 10200-10219.
- Gu, H., Zhang, H., Gao, C., Liang, C., Gu, J., & Guo, Z. (2018). New Functions of Polyaniline. *ES Materials & Manufacturing*, 1, 3-12.
- Hamsan, M. H., Aziz, S. B., Kadir, M. F. Z., Brza, M. A., & Karim, W. O. (2020). The study of EDLC device fabricated from plasticized magnesium ion conducting chitosan based polymer electrolyte. *Polymer Testing*, 90(106714), 1-10.
- Han, R., Liu, F., Wang, X., Huang, M., Li, W., Yamauchi, Y., Sun, X., & Huang, Z. (2020). Functionalised Hexagonal Boron Nitride for Energy Conversion and Storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 8, 14384-14399.
- Hong, X., Liu, Y., Li, Y., Wang, X., Fu, J., & Wang, X. (2020). Application Progress of Polyaniline, Polypyrrole and Polythiophene in Lithium-Sulfur Batteries. *Polymers*, 12(331), 1-27.
- Hu, Y. S., & Lu, Y. (2020). The mystery of electrolyte concentration: from superhigh to ultralow. *ACS Energy Letters*, 5, 3633-3636.
- Huang, Z., Li, L., Wang, Y., Zhang, C., & Liu, T. (2018). Polyaniline/graphene nanocomposites towards high-performance supercapacitors: A review. *Composites Communications*, 8, 83-92.
- Ikram, R., Jan, B. M., & Ahmad, W. (2020). An overview of industrial scalable production of graphene oxide and analytical approaches for synthesis and characterization. *Journal of Materials Research and Tecnology*, 9(5), 11587-11610.
- IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry, *Basic Definitions of Terms Relating to Polymers*, Butter Worths: London, **1974**.
- Jagadale, A., Zhou, X., Xiong, R., Dubal, D. P., Xu, J., & Yang, S. (2019) Lithium ion capacitors (LICs): Development of materials. *Energy Storage Materials*, 19, 314-329.
- Jangid, N. K., Jadoun, S., & Kaur, N. (2020). A review on high-throughput synthesis, deposition of thin films and properties of Polyaniline. *European Polymer Journal*, 125, 109485.
- Jha, R. K., Wan, M., Jacob, C., & Guha, P. K. (2018). Ammonia vapour sensing properties of *in situ* polymerized conducting PANI-nanofiber/WS<sub>2</sub> nanosheet composites. *New Journal of Chemistry*, 42, 735-745.
- Jin, X., Song, L., Yang, H., Dai, C., Xiao, Y., Zhang, X., Han, Y., Bai, C., Lu, B., Liu, Q., Zhao, Y., Zhang, J., Zhang, Z., & Qu, L. (2021). Stretchable supercapacitor at -30°C. *Energy & Environmental Science*, 14(5), 3075-3085.
- Karade, S. S., & Sankapal, B. R. (2018). Materials Mutualism through EDLC-Behaved MWCNTs with pseudocapacitive MoTe<sub>2</sub> nanopebbles: enhanced supercapacitive performance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, 15072-15082.
- Karaoglan, N., & Bindal, C. (2018). Synthesis and optical characterization of benzene sulfonic acid doped. *Engineering Science and Technology and International Journal*, 21(6), 1152-1158.
- Kavitha C. (2020). A review on reduced Graphene oxide hybrid nano composites and their prominent applications. *Materials Today: Proceedings*, 43(3), 811-816.
- Kazemi, F., Naghib, S. M., Zare, Y., & Rhee, K. Y. (2020) Biosensing Applications of Polyaniline (PANI)-Based Nanocomposites: A review. *Polymer Reviews*, 61(3), 553-597.
- Ketenoglu, D., Spiekermann, G., Harder, M., Oz, E., Koz, C., Yagci, M. C., Yilmaz, E., Yin, Z., Sahle, C. J., Detlefsk, B., & Yavas, H. (2018). X-ray Raman spectroscopy of lithium-ion battery electrolyte solutions in a flow cell. *Journal of Synchrotron Radiation*, 25, 1-6.
- Kouchachvili, L., Yaici, W., & Entchev, E. (2018). Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 374, 237-248.
- Kumar, R., Youssry, S., Ya, K. Z., Tan, W. K., Kawamura, G., & Matsuda, A. (2019). Microwave-assisted synthesis of Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@rGO ternary hybrids and electrochemical performance for supercapacitor electrode. *Diamond and Related Materials*, 101, 107622.
- Kumar, R., Youssry, S. M., Soe, H. M., Abdel-Galeil, M. M., Kawamura, G., & Matsuda, A. (2020). Honeycomb-like open-edged reduced-graphene-oxide-enclosed transition metal oxides (NiO/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) as improved electrode materials for high-performance supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 30, 101539.
- Kumar, S., Saeed, G., Zhu, L., Hui, K. N., Kim, N. H., & Lee, J. H. (2021). 0D to 3D carbon-based networks combined with pseudocapacitive electrode material for high energy density supercapacitor: A review. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126352.
- Lee, S. L., & Chang, C. J. (2019). Recent Developments about Conductive Polymer Based Composite Photocatalysts. *Polymers*, 11(206), 1-21.
- Lee, C., Kim, S. K., Choi, J. H., Chang, H., & Jang, H. D. (2017). Electrochemical performances of iron-cobalt oxides nanoparticles loaded crumpled graphene for supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 2030-2037.

- Lee, G., Kim, J. W., Park, H., Lee, J. Y., Lee, H., Song, C., Jin, S. W., Keum, K., Lee, C. H., & Ha, J. S. (2019). Skin-Like, Dynamically Stretchable, Planer Supercapacitors with Buckled Carbon Nanotube/Mn-Mo Mixed Oxide Electrodes and Air-Stable Organic Electrolyte. *ACS Nano*, 13(1), 855-866.
- Leonard, D. P., Wei, Z., Chen, G., Du, F., & Ji, X. (2018). Water-in-Salt electrolyte for potassium-ion batteries. *ACS Energy Letters*, 3, 373-374.
- Li, X., & Wei, B. (2013). Supercapacitors based on nanostructured carbon. *Nano Energy*, 2, 159-173.
- Li, B., Zheng, J., Zhang, H., Jin, L., Yang, D., Lv, H., Shen, C., Shellikeri, A., Zheng, Y., Gong, R., Zheng, J. P., & Zhang, C. (2018). Electrode materials, electrolytes and challenges in nonaqueous lithium-ion capacitors. *Advanced Matererials*, 1705670, 1-19.
- Li, Y., Lu, Y., Adelheim, O., Titirici, M. M., & Hu, Y. S. (2019). Intercalation chemistry of graphite: alkali metal ions and beyond. *Chemical Society Reviews*, 48, 4655-4687.
- Li, Z., Lin, J., Li, B., Yu, C., Wang, H., & Li, Q. (2021). Construction pf heteroatom-doped and three-dimensional graphene materials for the applications in supercapacitors: A review. *Journal of Energy Storage*, 44, 103437.
- Liao, G., Li, Q., & Xu, Z. (2019). The chemical modification of polyaniline with enhanced properties: a review. *Progress in Organic Coatings*, 126, 35-43.
- Liu, Y., Xiang, C., Chu, H., Qiu, S., McLeod, J., She, Z., Xu, F., Sun, L., & Zou, Y. (2019). Binary Co-Ni oxide nanoparticle-loaded hierarchical graphitic porous carbon for high-performance supercapacitors. *Materials Science & Technology*, 37, 135-142.
- Liu, S., Wei, L., & Wang, H. (2020). Review on reliability of supercapacitors in energy storage applications. *Applied Energy*, 278, 115436.
- Liu, W., Zhang, W., Zuo, S., Yao, C., & Li, X. (2021). MoS<sub>2</sub>-modified nitrogen-doped carbon nanotubes and their applications in supercapacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 27184-27197.
- Lou, Z., Wnag, L., Jiang, K., Wei, Z., & Shen, G. (2020). Reviews of wearable healthcare systems: Materials, devices and system integration. *Materials Science & Engineering R*, 140, 100523.
- Lu, C., & Chen, X. (2020). Latest Advances in Flexible Symmetric Supercapacitors: From Material Engineering to Wearable Applications. *Accounts of Chemical Research*, 53(8), 1468-1477.
- Maksoud, M. I. A., Fahim, R. A., Shalan, A. E., Elkodous, M. A., Olojede, S. O., Osman, A. I., Farrell, C., Al-Muhtaseb, A. H., Awed, A. S., Ashour, A. H., & Rooney, D. W. (2021). Advanced materials and technologies for supercapacitors used in energy conversion and storage: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 375-439.
- Mehtab, T., Yasin, G., Arif, M., Shakeel, M., Korai, R. M., Nadeem, M., Muhammad, N., & Lu, X. (2019). Metal-organic frameworks for energy storage devices: Batteries and Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 21, 632-646.
- Mei, B. A., Munteshari, O., Lau, J., Dunn, B., & Pilon, L. (2018). Physical interpretations of Nyquist Plots for EDLC Electrodes and Devices. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122, 194-206.
- Mohanty, A., Jaihindh, D. P., Fu, Y. P., Senanayak, S. P., Mende, L. S., & Ramadoss, A. (2021). An extensive review on three dimension architectural Metal-Organic Frameworks towards supercapacitor application. *Journal of Power Sources*, 488, 229444.
- Mousavi, S. M., Hashemi, S. A., Bahrani, S., Yousefi, K., Behbudi, G., Babapoor, A., Omidifar, N., Lai, C. W., Gholami, A., & Chiang, W. H. (2021). Recent Advancements in Polythiophene-Based Materials and their Biomedical, Geno Sensor and DNA Detection. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 6850-6867.
- Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., & Thirumalai, J. (2019). A review in recent advances in hybrid supercapacitors: design, fabrication and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 123-145.
- Najib, S., & Erdem, E. (2019). Current progress acieved in novel materials for supercapacitor electrodes: mini review. *Nanoscale Advances*, 1, 2817-2827.
- Namsheer, K., & Rout, C. S. (2021). Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *Royal Society of Chemistry Advances*, 11, 5659-5697.
- Oca, L., Guillet, N., Tessard, R., & Iraola, U. (2019). Lithium-ion capacitor safety assessment under electrical abuse tests based on ultrasound characterization and cell opening. *Journal of Energy Storage*, 23, 29-36.
- Pang, A. L., Arsad, A., & Ahmadipour, M. (2020). Synthesis and factor affecting on the conductivity of polypyrrole: a short review. *Polymers Advanced Technologies*, 32, 1428-1454.
- Parnell, C. M., Chhetri, B. P., Mitchell, T. B., Watanabe, F., Kannarpady, G., RanguMagar, A. B., Zhou, H., Alghazali, K. M., Biris, A. S., & Ghosh, A. (2019). Simultaneous Electrochemical Deposition of Cobalt Complex and Poly(pyrrole) thin films for supercapacitor electrodes. *Scientific Reports*, 9, 5650-5663.
- Pazhamalai, P., Krishnamoorthy, K., Manoharan, S., & Kim, S. J. (2018). High energy symmetric supercapacitor based on mechanically delaminated few-layeres MoS<sub>2</sub> sheets in organic electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, 771, 803-809.
- Peng, J. & Han, Y. (2020). Recent advances in conjugated polythiophene-based rod-rod block copolymers: from morphology control to optoelectronic applications. *Giant*, 4, 100039.
- Pimenta, M. A., Geracitano, L. A., & Fagan, S. B. (2019). History and national initiatives of carbon nanotube and graphene research in Brazil. *Brazilian Journal of Physics*, doi: 10.1007/s13538-018-0618-0.

- Qiu, T., Liang, Z., Guo, W., Tabassum, H., Gao, S., & Zou, R. (2020). Metal-Organic Framework-Based Materials for Eenergy Conversion and Storage. *ACS Eney Letters*, 5, 520-532.
- Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K. H., Yang, J., Kumar, S., Mehmood, A., & Kwon, E. E. (2018). Recent advancements in supercapacitor technology. *Nano Energy*, 52, 441-473.
- Reece, R., Lekakou, C., & Smith, P. A. (2018). A structural supercapacitor based on activated carbon fabric and solid electrolyte. *Materials Science and Technology*, 35, 368-375.
- Reece, R., Lekakou, C., & Smith, P. A. (2020). A high-performance structural supercapacitor. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(23), 25683-25692.
- Saha, S., Samanta, P., Murmu, N. C., & Kuila, T. (2018). Areview on the heterostructure nanomaterials for supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*, 17, 181-202.
- Sahin, M. E., Blaabjerg, F., & Sangwongwanich, A. (2020). A review on supercapacitor materials and developimts. *Turkish Journal of Materials*, 5(2), 10-24.
- Salameh, T., Abdelkareem, M. A., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Al-Chaderchi, M., & Rezk, H. (2020). Integrated standalone hybrid solar PV, fuel cell and diesel generator power system for battery or supercapacitor storage systems in Khorfakkan, United Arab Emirates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(8), 6014-6027.
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Sentharamaikannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber Polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566-581.
- Shoae, N., Daneshpour, M., Azimzadeh, M., Mahshid, S., Khoshfetrat, S. M., Jahanpeyma, F., Gholaminejad, A., Omidfar, K., & Foruzandeh, M. (2019). Electrochemical sensors and biosensors based on the use of polyaniline and its nanocomposites: a review on recent advances. *Microchimica Acta*, 186(465), 1-29.
- Silva, F. D., Rocha, R. G., Rocha, D. P., Silva, M. N. T., Nossol, E., Muñoz, R. A. A., Semaan, F. S., & Dornellas, R. M. (2020). In situ electrochemical exfoliation of embedded graphite to superficial graphene sheets for electroanalytical purposes. *Electrochimica Acta*, 20, 1-38.
- Stejskal, J., & Trchová, M. (2018). Conducting polypyrrole nanotubes: a review. *Chemical. Papers*, 10.1007/s11696-018-0394-x.
- Sun, G., Yang, H., Zhang, G., Gao, J., Jin, X., Zhao, Y., Jiang, L., & Qu, L. (2018). A capacity recoverable zinc-ion micro-supercapacitor. *Energy & Environmental Science*, 11, 3367-3374.
- Sundriyal, S., Kaur, H., Bhardwaj, S. K., Mishra, S., Kim, K. H., & Deep, A. (2018). Metal-organic frameworks and their composites as efficient electrodes for supercapacitor applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 369, 15-38.
- Vul, A., & Dideikin, A. T. (2018). Graphene oxide and derivatives: the place in graphene family. *Fronteirs in Physics*, 103389/fphy.2018.00149.
- Wang, X., Ma, Y., Sheng, X., Wang, Y., & Xu, H. (2018). Ultrathin polypyrrole nanosheets via Space-confined synthesis for efficient photothermal therapy in the second near-infrared window. *Nano Letters*, 18, 2217-2225.
- Wang, Y., Chen, F., Liu, Z., Tang, Z., Yang, Q., Zhao, Y., Du, S., Chen, Q., & Zhi, C. (2019). A highly elastic and reversibly stretchable all-polymer supercapacitor. *Angewandte Chemie International Edition*, 58, 15707-15711.
- Wang, Y., Zhang, L., Hou, H., Xu, W., Duan, G., He, S., Liu, K., & Jiang, S. (2020). Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review. *Journal of Materials Science*, 56, 173-200.
- Wang, Y., Wu, X., Han, Y., & Li, T. (2021). Flexible supercapacitor: overview and outlooks. *Journal of Energy Storage*, 42, 103053.
- Wang, T., Yan, L., He, Y., Alhassan, S. I., Gang, H., Wu, B., Jin, L., & Wang, H. (2022). Application of polypurrole-based adsorbents in the removal of fluoride: a review. *Royal Society of Chemistry Advances*, 12, 3505-3517.
- Werneck, I. H. S. R., Assis, M. B. S., & Pereira, R. P. (2018). Molybdenum oxide micro- and nanorods: structure and thermal properties dependent on pertubation during synthesis. *Materials Research Express*, 5(105009), 1-16.
- Willfahrt, A., Steiner, E., Hotzel, J., & Crispin, X. (2019). Printable acid-modified corn starch as non-toxic, disposable hydrogel-polymer electrolyte in supercapacitors. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 125(474), 1-10.
- Wu S., Chen, Y., Jiao, T., Zhou, J., Cheng, J., Liu, B., Yang, S., Zhang, K., & Zhang, W. (2019). An aqueous Zn-Ion hybrid supercapacitor with high energy density and ultrastability up to 80.000 cycles. *Advanced Energy Materials*, 9(47), 1902915.
- Xia, D. D., Gong, F., Pei, X., Wang, W., Li, H., Zeng, W., Wu, M., & Papavassiliou, D. V. (2018). Molybdenum and tungsten disulfides-based nanocomposite films for energy storage and conversion: a review. *Chemical Engineering Journal*, 18, 1-75.
- Xie, J., Yang, P., Wang, Y., Qi, T., Lei, Y., & Li, C. M. (2018). Puzzles and confusions in supercapacitor and battery: theory and solutions. *Journal of Power Sources*, 401, 213-223.
- Xu, B., Wanga, H., Zhua, Q., Suna, N., Anasoric, B., Hua, L., Wanga, F., Guanb, Y., & Gogotsic, Y. (2018). Reduced graphene oxide as a multi-functional conductive binder for supercapacitor electrodes. *Energy Storage Materials*, 12, 128-136.
- Xu, B., Zhang, H., Mei, H., & Sun, D. (2020). Recent progress in metal-organic framework-based supercapacitor electrode materials. *Coordination Chemistry Reviews*, 420, 213438.

- Yadav, S., & Devi, A. (2020). Recent advancements of metal oxides/Nitrogen-doped graphene nanocomposites for supercapacitor electrode materials. *Journal of Energy Storage*, 30, 101486.
- Yang, H., Han, X., Douka, A. I., Huang, L., Gong, L., Xia, C., Park, H. S., & Xia, B. Y. (2020). Advanced Oxygen Electrocatalysis in Energy Conversion and Storage. *Advanced Functional Materials*, 31(12), 1-29.
- Ye, W., Wang, H., Ning, J., Zhong, Y., & Hu, Y. (2020). New TYPES Of hybrid electrolytes for supercapacitors. *Journal of Energy Chemistry*, 57, 219-232.
- Yi, T. F., Sari, H. M. K., Li, X., Wang, F., Zhu, Y. R., Hu, J., Zhang, J., & Li X. (2021). A review of niobium oxides based nanocomposites for lithium-ion batteries, sodium-ion batteries and supercapacitors. *Nano Energy*, 85, 105955.
- Yin, J., Zhang, W., Alhebshi, N. A., Salah, N., & Alshareef, H. N. (2020). Synthesis strategies of porous carbon for supercapacitor applications. *Small Methods*, 4(3), 1900853.
- You, X., Mirsa, M., Gregori, S., & Mohanty, A. K. (2018). Preparation of an Electric double layer capacitor (EDLC) using miscanthus-derived biocarbon. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, 318-324.
- Yu, L., & Chen, G. Z. (2019). Ionic Liquid-Based Electrolytes for Supercapacitor and Supercapattery. *Frontiers in Chemistry*, doi: 10.3389/fchem.2019.00272.
- Yu, X., & Manthiram, A. (2018). Electrode-electrolyte interfaces in lithium-based batteries. *Energy & Environmental Science*, 11, 527-543.
- Yu, P., Cao, G., Yi, S., Zhang, X., Li, C., Sun, X., Wang, K. & Ma, Y. (2018). Binder-free 2D titanium carbide (MXene)/carbon nanotube composites for high-performance lithium-ion capacitors. *Nanoscale*, 10, 5906-5913.
- Yu, F., Wang, L., Wang, Y., Shen, X., Cheng, Y., & Ma, J. (2019). Faradaic reactions in capacitive deionization for desalination and ion separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 15999-16028.
- Yu, W., Sisi, L., Haiyan, Y. & Jie, L. (2020). Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: a review. *Royal Society of Chemistry Advances*, 26, 15328-15345.
- Zare, E. N., Makvandi, P., Ashtari, B., Rossi, F., Motahari, A., & Perale, G. (2020). Progress in conductive polyaniline-based nanocomposites for biomedical applications: a review. *Journal of Medicinal Chemistry*, 63, 1-22.
- Zhang, L., Hu, X., Wang, Z., Sun, F., & Dorrell, D. G. (2018a). A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1868-1878.
- Zhang, L., Du, W., Nautiyal, A., Liu, Z., & Zhang, X. (2018b). Recent progress on nanostructured conducting polymers and composites: synthesis, application and future aspects. *Science China Materials*, 61, 303-352.
- Zou, C., Zhang, L., Hu, X., Wang, Z., Wik, T., & Pecht, M. (2018). A review of fractional-order techniques applied to lithium-ion batteries, lead-acid batteries, and supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 390, 286-296.