



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

NATÁLIA ALMEIDA PATÚ

**NANOTECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA:
com ênfase na aplicabilidade em baterias para veículos elétricos**

Recife

2025

Autor(a): _____

NATÁLIA ALMEIDA PATÚ

**NANOTECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA:
com ênfase na aplicabilidade em baterias para veículos elétricos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador(a): _____

Profa. Dra. Renata Francisca da Silva Santos.

Universidade Federal de Pernambuco

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Patú, Natália Almeida.

Nanotecnologia em sistemas de armazenamento de energia: com ênfase na aplicabilidade em baterias para veículos elétricos / Natália Almeida Patú. - Recife, 2025.

66p : il.

Orientador(a): Renata Francisca da Silva Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Armazenamento de Energia. 2. Nanotecnologia. 3. Baterias. 4. Veículos elétricos. 5. Sustentabilidade. I. Santos, Renata Francisca da Silva. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

NATÁLIA ALMEIDA PATÚ

**NANOTECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA:
com ênfase na aplicabilidade em baterias para veículos elétricos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia de Energia.

Aprovado em: 09 / 04 /2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Carlos Araujo da Costa
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso foi uma jornada desafiadora e enriquecedora, que não teria sido possível sem o apoio de muitas pessoas. Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder forças e perseverança ao longo dessa caminhada. Aos meus pais, Joselita e Roberto, pelo amor incondicional, pelo incentivo constante e pelo apoio nos momentos mais difíceis. Em particular, a minha mãe, Joselita, principalmente pelo apoio nas últimas semanas. À minha tia e meu tio Josete e Silvan Martins. Aos meus primos, irmãos, que não soltaram minha mão em toda essa caminhada, Ana Carolina, Bruna e Rodrigo Almeida.

À minha maravilhosa orientadora, professora Renata, principalmente pela paciência, dedicação e valiosas orientações ao longo da pesquisa. Seu conhecimento e incentivo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sem ela, nada disso teria sido possível. Aos colegas de curso e amigos, que compartilharam comigo essa jornada acadêmica, oferecendo apoio, aprendizado e momentos de descontração que tornaram essa trajetória mais leve e especial. A todos os professores que, ao longo do curso, contribuíram com conhecimento e inspiração, enriquecendo minha formação acadêmica e profissional. À Universidade Federal de Pernambuco, e à toda equipe do Departamento de Energia Nuclear, que sedia o curso de Engenharia de Energia.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, e por toda a caminhada que foi essa graduação. A cada um de vocês, meu sincero reconhecimento e gratidão.

RESUMO

A crescente demanda por soluções energéticas tem impulsionado pesquisas sobre formas mais eficientes de geração e armazenamento de energia. Assim, surge o desafio de gerar e armazenar uma quantidade cada vez maior de energia, porém através de equipamentos mais eficientes, que ocupem menos espaço e sejam mais sustentáveis. Nesse contexto, o avanço da nanotecnologia tem revolucionado os sistemas de armazenamento de energia, possibilitando melhorias significativas no desempenho das baterias utilizadas em veículos elétricos, ao atuar em nível molecular e atômico, permitindo superar as limitações de sistemas convencionais como baterias e supercapacitores. O objetivo deste trabalho é, portanto, abordar os avanços da nanotecnologia aplicados às baterias de íons de lítio, explorando nanomateriais como nanotubos de carbono, grafeno, nanopartículas cerâmicas e nanofibras de polímeros, e como eles podem melhorar o desempenho, a eficiência e a durabilidade desses dispositivos, tornando essas baterias menores, mais leves e eficientes. A pesquisa destaca os impactos dessas inovações na capacidade de armazenamento, na redução do tempo de recarga e na sustentabilidade do setor automotivo. Dessa forma, a nanotecnologia permitirá elevar as taxas de eletrificação da frota, que contribui em até 50% menos emissão de CO₂ a cada veículo movido a combustível fóssil substituído. Além de aprimorar o armazenamento de energia, já que um motor elétrico consegue converter até 90% da energia mecânica contra no máximo 40% de um motor a combustão, acelerando o desenvolvimento de alternativas mais eficientes e sustentáveis para a transição energética.

Palavras-chave: armazenamento de energia; nanotecnologia; baterias; veículos elétricos; sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing demand for energy solutions has driven research into more efficient methods of energy generation and storage. Consequently, the challenge lies in producing and storing increasingly larger amounts of energy through more efficient equipment that occupies less space and is more sustainable. In this context, advances in nanotechnology have been revolutionizing energy storage systems by enabling significant improvements in the performance of batteries used in electric vehicles. By operating at the molecular and atomic levels, nanotechnology makes it possible to overcome the limitations of conventional systems such as batteries and supercapacitors. The objective of this study is, therefore, to address the advancements in nanotechnology applied to lithium-ion batteries, focusing on nanomaterials such as carbon nanotubes, graphene, ceramic nanoparticles, and polymer nanofibers, and how they can enhance the performance, efficiency, and durability of these devices, making batteries smaller, lighter, and more efficient. The research highlights the impact of these innovations on storage capacity, charging time reduction, and the sustainability of the automotive sector. Thus, nanotechnology is expected to facilitate higher rates of fleet electrification, contributing up to 50% fewer CO₂ emissions for each fossil fuel-powered vehicle replaced. Moreover, it enhances energy storage efficiency, as electric motors can convert up to 90% of electrical energy into mechanical energy, compared to a maximum of 40% in internal combustion engines, thereby accelerating the development of more efficient and sustainable alternatives for the energy transition.

Keywords: energy storage; nanotechnology; batteries; electric vehicles; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de uma pilha de Zinco/dióxido de manganês	17
Figura 2	Esquema de composição de uma bateria alcalina	18
Figura 3	Esquema de eletrodos e separador em bateria de NIMH e Nicd	20
Figura 4	Modelo de funcionamento de uma bateria em um Iphone	21
Figura 5	Bateria de íon-lítio smartphones atuais	21
Figura 6	Esquema de princípio de funcionamento de uma célula a combustível	23
Figura 7	Esquema representativo de um supercapacitor do tipo EDLC	27
Figura 8	Métodos de manufatura em nanoescala: <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>	31
Figura 9	Esquema de banco de baterias de um carro elétrico da marca Audi	36
Figura 10	Bateria <i>Blade</i> BYD, presente nos modelos BYD vendidos no Brasil	37
Figura 11	Protótipo da bateria flexível Ipen	39
Figura 12	Fotografia do ânodo <i>slurry-cast SiG</i> e ilustração das camadas das células de bolsa	40
Figura 13	Protótipo de bateria de estado sólido desenvolvido pela Toyota e Idemitsu	41
Figura 14	Bateria de estado sólido da nova geração da Mercedes-Benz	42
Figura 15	Película com germânio desenvolvida por pesquisadores da UFABC	43
Figura 16	Linha de montagem da chinesa BYD em Hefei	44
Figura 17	Esquema de dados de reciclagem de lítio no mundo	45
Figura 18	Emissões de CO ₂ no setor de transporte no Brasil	49
Figura 19	Bateria de célula que se autorrepara.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALD	<i>Atomic Layer Deposition</i> (Deposição por Camada Atômica).
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNTs	Nanotubos de carbono
CSIC	<i>Consejo Superior de Investigaciones Científicas</i>
CVD	Deposição química de vapor
Feec-Unicamp	Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas
Ipen	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
KAIST	Instituto Avançado de Ciência e Tecnologia da Coreia
LFP	Lítio Ferro-Fosfato
Li-ion	Íons de lítio
Li-S	Combinação de Lítio e Enxofre
LNNano	Laboratório Nacional de Nanotecnologia
MCFC	Célula a combustível de carbonato fundido
MEMS	Microelectromechanical Systems
MOF	<i>Metal-organic framework</i>
Na-ion	Íons de sódio
NCA	Níquel-Cobalto-Alumínio
NEMS	<i>Nanoelectromechanical Systems</i>
NMC	Níquel-Manganês-Cobalto
NTNU	Universidade de Ciência e Tecnologia da Noruega
PAFC	Célula a combustível de ácido fosfórico
PAN	Nanofibras de Poliacrilonitrila
PEMFC	Célula a combustível de membrana de troca de prótons
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno
SEI	<i>Solid Electrolyte Interphase</i>
SEM	Microscopia de varredura eletrônica
SOFC	Célula a combustível de óxido sólido
TEM	Microscopia de transmissão eletrônica
UFABC	Universidade Federal do ABC
UPS	Fontes de alimentação ininterrupta

USP	Universidade de São Paulo
VACNT	Nanotubos de carbono alinhados verticalmente
VEs	Veículos elétricos
XAS	Espectroscopia de absorção de raios X
XRD	Difração de raios X

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONCEITOS PRELIMINARES	13
2.1	Nanomateriais	13
2.2	Sistemas de Armazenamento de energia	14
2.2.1	Pilhas.....	16
2.2.2	Baterias.....	17
2.2.3	Células a combustível.....	23
2.2.4	Supercapacitores.....	26
3	METODOLOGIA	28
4	ANÁLISE DA LITERATURA CIENTÍFICA	30
4.1	Fundamentos da nanotecnologia	30
4.2	Aplicações da nanotecnologia na ciência e engenharia dos materiais	33
4.3	Sistemas de armazenamento de energia eletroquímica	34
4.3.1	Tipos de baterias utilizadas em veículos elétricos.....	34
4.3.2	Desafios e limitações atuais dos sistemas convencionais de armazenamento de energia.....	35
4.4	Aplicações de nanotecnologia em sistemas de armazenamento de energia	37
4.4.1	Nanomateriais para baterias de veículos elétricos.....	37
4.4.2	Impacto da nanotecnologia na eficiência das baterias.....	39
4.5	Avanços da nanotecnologia em baterias de estado sólido	40
4.6	Impactos ambientais e sustentabilidade no uso de baterias de carros elétricos	43
4.7	Desafios na implementação de nanomateriais em baterias comerciais.	46
5	PERSPECTIVAS FUTURAS PARA A NANOTECNOLOGIA E VEÍCULOS ELÉTRICOS	50
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVA	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por dispositivos eletrônicos, veículos elétricos e aplicações industriais tem impulsionado a busca por sistemas de armazenamento de energia mais eficientes, compactos e sustentáveis. Nesse contexto, o desenvolvimento de materiais inovadores, como os nanomateriais, desempenham um papel fundamental, especialmente no que se refere à redução de custos e ao aprimoramento do desempenho energético (OLIVEIRA, 2020; SAKATA, 2023; ZAPAROLLI, 2023). Entre as principais aplicações dessas inovações, destaca-se o desenvolvimento de baterias para veículos elétricos (VEs), cuja eficiência e autonomia dependem diretamente da evolução dos materiais utilizados em sua composição. Diante disso, a nanotecnologia tem desempenhado um papel fundamental, possibilitando melhorias significativas na densidade energética, na durabilidade e no tempo de recarga das baterias (LEICHSENRING, 2023, VICENTE, 2018).

Os nanomateriais apresentam propriedades excepcionais, como alta condutividade elétrica, elevada área superficial e excelente estabilidade química, tornando-se componentes estratégicos para aprimorar os sistemas eletroquímicos de armazenamento de energia (GABER et al, 2024). Dentre as principais abordagens, destacam-se o uso de nanotubos de carbono, grafeno e nanofios metálicos (EDELSTEIN, 2016; FIORAVANTE, 2009), que contribuem para a otimização dos eletrodos e eletrólitos, resultando em maior eficiência energética e menor degradação ao longo dos ciclos de carga e descarga (OLIVEIRA, 2020).

No Brasil, a aplicação da nanotecnologia no armazenamento de energia tem apresentado progressos, embora ainda existam desafios a serem superados. Um exemplo relevante é a instalação de um sistema de armazenamento em larga escala, desenvolvido pela Vale em parceria com a Siemens e a MicroPower Comerc. Esse sistema, com capacidade de até 10 MW, utiliza Tesla *Megapacks* e está localizado em uma instalação portuária no Rio de Janeiro, com o objetivo de reduzir custos ao controlar a demanda energética nos horários de pico (SINDISTAL, 2024). Ainda existem desafios relacionados à produção em larga escala, aos custos de importação de matérias-primas e à necessidade de políticas públicas que incentivem a adoção de tecnologias mais inovadoras em sistemas de armazenamento de energia especificamente para o mercado de veículos elétricos. Entretanto, iniciativas voltadas para o desenvolvimento de baterias de íons de lítio com nanomateriais e pesquisas

voltadas para alternativas sustentáveis demonstram o potencial de crescimento dessa área (MARTÍNEZ, 2024; OLIVEIRA, 2020).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo explorar, através de pesquisa bibliográfica, as aplicações da nanotecnologia nos sistemas de armazenamento de energia, com ênfase no desenvolvimento de baterias mais eficientes para veículos elétricos. Serão apresentados os principais sistemas de armazenamento de energias utilizados atualmente, além dos principais nanomateriais aplicados em baterias de veículos elétricos, bem como suas vantagens e desafios, o panorama atual e as perspectivas futuras para a implementação dessa tecnologia no setor automotivo.

2 CONCEITOS PRELIMINARES

2.1 Nanomateriais

Nanomateriais são materiais com pelo menos uma dimensão na escala nanométrica, isto é, da ordem de 1 a 100 nanômetros. A dimensão e a estrutura são os principais aspectos levados em conta na produção de um nanomaterial, porque vai influenciar no tipo de material usado e na sua respectiva aplicação (FECHINI, 2020). Nanotubos, por exemplo, são estruturas tubulares com diâmetros na escala nanométrica (EDELSTEIN, 2016). Nanofios são fios com diâmetros nanométricos e comprimentos variáveis. Filmes Finos são camadas de material com espessura nanométrica. E nanocompósitos são materiais compostos que incorporam nanomateriais para melhorar suas propriedades, sejam elas, mecânicas, térmicas, elétricas e/ou outras (FIORAVANTE, 2009; PEIXOTO, 2021; SAXENA et al, 2023).

Os nanomateriais possuem uma área de superfície específica maior, que constituem a relação superfície-volume, e que pode resultar em maior reatividade química e propriedades únicas de adsorção. As superfícies podem ser combinadas com grupos químicos para obter propriedades específicas, como hidrofobicidade ou afinidade seletiva. Alguns nanomateriais podem, ainda, exibir propriedades ópticas únicas devido a efeitos de confinamento quântico, como a mudança de cor com a alteração do tamanho das partículas. Ou podem ser utilizados em aplicações como biossensores e dispositivos optoeletrônicos (SAXENA et al, 2023).

Já quando consideramos as propriedades mecânicas, eles conseguem desenvolver maior resistência mecânica e dureza, em comparação com materiais maiores devido a defeitos estruturais reduzidos. Nanotubos de carbono, por exemplo, são conhecidos por sua altíssima resistência e leveza. Por outro lado, as propriedades elétricas podem ser ajustadas através da manipulação da estrutura em nanoescala, permitindo a criação de materiais com condutividade específica. Nanomateriais magnéticos podem também exibir superparamagnetismo, propriedade na qual exibem magnetismo apenas na presença de um campo magnético externo, e são utilizados em aplicações como gravação magnética e ressonância magnética (EDELSTEIN, 2016; SAXENA et al, 2023).

Algumas aplicações de nanomateriais já difundidas, incluem a área da medicina, como entrega controlada de medicamentos dentro do organismo,

diagnósticos por imagem, terapias de hipertermia e biomateriais para regeneração de tecidos (CANCINO et al, 2014). Na área da eletrônica, podemos citar os transistores nas memórias, nos sensores ou displays de alta resolução. Além de desenvolvimento de dispositivos menores, mais rápidos e eficientes (RIVERA et al, 2014). No setor de construção civil, temos os nanocompósitos para aumentar a resistência e durabilidade e os revestimentos que oferecem propriedades específicas como autolimpeza (SAXENA et al, 2023).

Por fim, para o meio ambiente temos como exemplo as tecnologias para purificação de água e ar e materiais para remediação de poluentes já muito utilizadas. E no setor de energia, além dos sistemas de armazenamento, podemos citar os materiais para melhorar a eficiência de células solares (IBERDROLA, s.d.), nanocompósitos na fabricação de pás eólicas (CAMPOS, 2013), cerâmicas para revestimento de combustível nuclear (MACIEIRA, 2020), nanossensores para detectar vazamentos radioativos (LIMA, 2022), etc.

2.2 Sistemas de Armazenamento de energia

O armazenamento de energia é a capacidade de armazenar energia gerada em um determinado momento para uso posterior. Existem muitas formas diferentes, desde baterias, que convertem energia química em elétrica, como as de íon-lítio em dispositivos portáteis, até grandes reservatórios de água usados em usinas hidrelétricas. Os sistemas de armazenamento são de suma importância porque muitas fontes de energia como a solar, eólica e hidrelétrica, são intermitentes, o que significa que produzem energia apenas em determinados momentos do dia ou em determinadas condições climáticas (VIAN et al, 2021).

Além de ter a função de uso posterior, o armazenamento de energia também é útil em emergências, como apagões e quedas de energia, e em locais onde a energia não é facilmente acessível, como áreas remotas ou ainda em sistemas de transporte elétrico, onde é necessário armazenar energia para permitir que os veículos se movam a certas distâncias. Cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha do método mais adequado depende da aplicação específica e das necessidades do armazenamento (MENDONÇA, 2022).

Entre as diversas formas de armazenamento de energia, podemos citar os capacitores, que são dispositivos que armazenam energia e liberam de forma

temporária através de um campo elétrico entre duas placas condutoras separadas por um material isolante. Eles são usados principalmente em sistemas elétricos de alta potência, como em alguns modelos de carros elétricos onde são fontes de energia de curto prazo e trabalham em conjunto com a bateria para fornecer energia rápida para o sistema de aceleração e frenagem do carro. Ajudam a manter a tensão estável, além de reduzirem ruídos e interferências no fornecimento de energia, mas geralmente têm capacidade limitada de armazenamento, vida útil curta, resistência a temperaturas relativamente baixas e sensível a umidade em comparação com as baterias (PORTAL SOLAR, s.d; REZENDE et al, 2022).

Os supercondutores são uma outra maneira de armazenar energia. Eles têm a habilidade de conduzir eletricidade com pouca resistência, permitindo que a corrente flua indefinidamente e permitindo que a energia seja armazenada em um circuito supercondutor sem perda significativa de energia. Eles são usados principalmente em aplicações de alta potência, como sistemas de transmissão de energia, aparelhos de ressonância magnética nuclear, que utilizam bobinas supercondutoras para gerar campos magnéticos intensos, ou aceleradores de partículas, que utilizam magnetos supercondutores para a pesquisa em física de altas energias. Contudo, necessitam de baixas temperaturas para se tornarem supercondutores, o que torna os custos operacionais altos, além da corrente sofrer influência de ruído (BRANÍCIO, 2001; GINLEY et al, 2011).

Podemos também utilizar o hidrogênio, fornecido a partir da energia elétrica gerada por um processo de eletrólise da água e que consegue ser armazenado em tanques de alta pressão ou convertido em hidrogênio líquido para armazenamento em grandes quantidades, para então, serem usados posteriormente com o objetivo de gerar energia elétrica em uma célula combustível. Pode também ser armazenado na forma de gás pressurizado, sendo a maneira mais comum utilizada. O hidrogênio verde é uma fonte de energia limpa, já que não emite gás carbônico na atmosfera. Porém, é um gás muito leve e difícil de armazenar, além do confinamento ser um processo caro e complexo (ALMEIDA et al, 2016; EIA, 2024).

Há ainda, os sistemas de armazenamento de calor a energia térmica, que podem ser estocados em materiais como pedras, líquidos ou ainda em canais com camadas alternadas de material de armazenamento como por exemplo na água ou no óleo, para que possa ser usada posteriormente como fonte de calor. O sistema funciona da seguinte maneira, ele é carregado com um gás quente que aumenta a

energia térmica armazenada e depois é descarregado com um gás frio. A maior vantagem desse tipo de sistema é a estabilidade na geração de energia, com um menor custo de armazenamento, maior eficiência energética e maior sustentabilidade (Ferreira, 2020).

A maneira mais comum de armazenamento de energia são os sistemas eletroquímicos, no qual a energia é armazenada na forma de energia química e convertido em energia elétrica para ser utilizada a posteriori. Os tipos mais comuns desse tipo de armazenamento são as pilhas e as baterias (GINLEY et al, 2011).

2.2.1 Pilhas

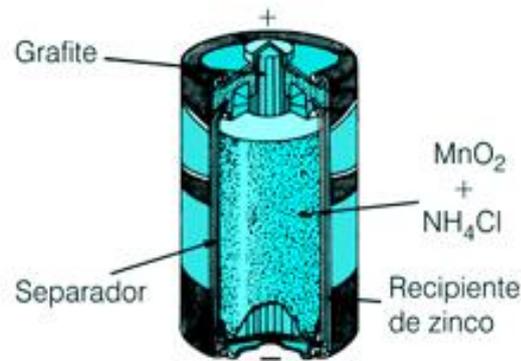
Também conhecidas como células eletroquímicas, as pilhas funcionam com base em reações eletroquímicas que ocorrem entre dois metais diferentes e um eletrólito, também chamado de solução iônica. Elas são compostas por dois eletrodos, geralmente um ânodo e um cátodo separados pelo eletrólito. Quando os eletrodos são conectados por um circuito externo, os elétrons fluem do ânodo para o cátodo, gerando uma diferença de potencial elétrico entre os dois metais (GINLEY et al, 2011; VIAN et al, 2021).

O ânodo é o eletrodo negativo, onde ocorre a oxidação ou perda de elétrons, enquanto o cátodo é o eletrodo positivo, onde ocorre a redução ou ganho de elétrons. Durante a operação da pilha, os elétrons fluem do ânodo para o cátodo através do circuito externo, enquanto os íons no eletrólito fluem em direção oposta para manter a neutralidade de carga. Isso é o que cria uma corrente elétrica no circuito externo, e que pode ser usada para alimentar dispositivos elétricos (GINLEY et al, 2011).

As pilhas podem ser classificadas em dois tipos: primárias e secundárias. As pilhas primárias são aquelas que não podem ser recarregadas, como por exemplo as pilhas alcalinas, pilhas de zinco-carbono ou pilhas de lítio. Enquanto as secundárias podem ser recarregadas várias vezes (GINLEY et al, 2011).

Elas podem ser usadas em uma ampla variedade de aplicações, desde dispositivos eletrônicos portáteis como calculadoras e relógios até em sistemas de armazenamento de energia renovável em grande escala. No entanto, é importante lembrar que, após seu uso, as pilhas devem ser descartadas corretamente, pois muitos tipos de pilhas contêm substâncias tóxicas que podem poluir o meio ambiente (BOCCHI et al, 2000).

Figura 1 - Esquema de uma pilha de Zinco/dióxido de manganês



Fonte: Bocchi *et al.*, 2000.

2.2.2 Baterias

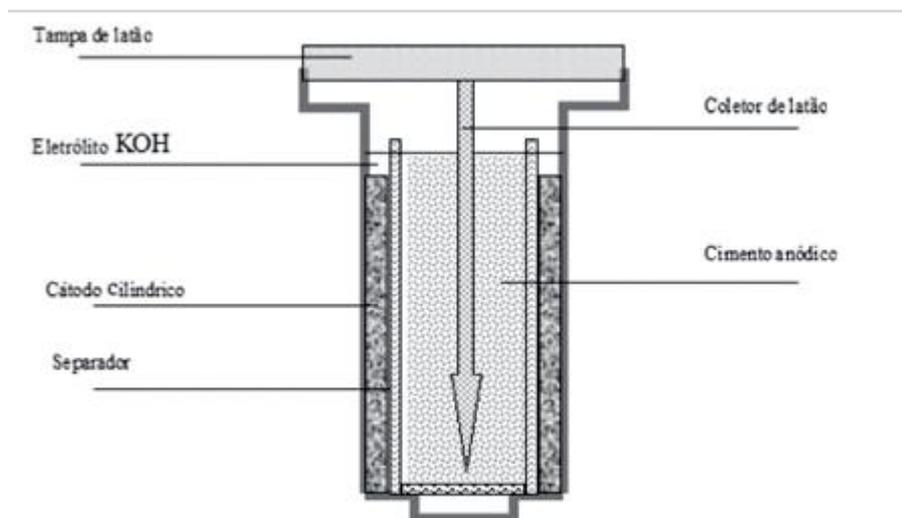
As baterias são as formas mais comuns de armazenamento de energia elétrica. Elas convertem a energia química em energia elétrica quando necessário, funcionando como se fossem várias pilhas ligadas em série e/ou paralelo. Quando a bateria é conectada a um circuito elétrico externo durante a descarga, os elétrons fluem do ânodo para o cátodo através do circuito, enquanto íons fluem através do eletrólito para equilibrar a carga. Nos casos em que a bateria é recarregada, uma fonte de energia externa é usada para forçar os elétrons a fluírem na direção oposta, do cátodo para o ânodo, e restaurar a carga original da bateria (BUCHMANN, 2001; GINLEY *et al.*, 2011). As baterias também são usadas em sistemas de armazenamento de energia renovável como painéis solares e turbinas eólicas, para que possa armazenar a energia gerada durante períodos de baixa demanda e fornecê-la durante períodos de alta demanda. Além de serem usadas em diversas outras aplicações como os veículos elétricos (MENDONÇA, 2022; VIAN *et al.*, 2021).

Existem diversos tipos de baterias no mercado atualmente, cada tipo com suas características e aplicações específicas. Elas podem ser divididas em duas categorias: as primárias, que não são recarregáveis, como as baterias alcalinas, baterias de zinco-carbono, e algumas bateria de lítio, que não são recarregáveis. E as secundárias, que permitem a recarga, como as de chumbo-ácido, NiCd, NiMH, Li-ion,

Li-Po, além das baterias de estado sólido e baterias de fluxo (BOCCHI et al, 2000; GINLEY et al, 2011; VIAN et al, 2021). Alguns exemplos incluem:

Baterias alcalinas (Figura 1) contêm hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio. Isso faz com que ocorra transferência de elétrons de um polo para o outro com mais facilidade. São mais presentes em dispositivos eletrônicos simples, como lanternas, controle remoto, relógios, brinquedos e detectores de fumaça. São baterias baratas, fáceis de encontrar e podem durar bastante tempo. Possuem grande capacidade de energia armazenada e de potência. Não possuem cádmio e mercúrio na sua composição, como em alguns outros modelos de bateria, sendo, portanto, menos tóxico ao meio ambiente. São também versáteis, adaptando-se a todos os tipos de tamanhos. Contudo, são mais caras do que as baterias comuns, e devem ser descartadas corretamente, pois podem contaminar o solo, a água e o ar (BOCCHI et al, 2000; GINLEY et al, 2011).

Figura 2 – Esquema de composição de uma bateria alcalina



Fonte: Matsubara *et al.*, 2007.

Bateria de zinco-carbono: é uma das mais antigas e econômicas, comumente utilizada em dispositivos de baixo consumo de energia, como controles remotos, lanternas, relógios e brinquedos. No caso desse tipo de bateria, o zinco serve como o eletrodo negativo e o cátodo é geralmente composta de carbono misturado com dióxido de manganês (MnO_2), que atua como material redutor (BOCCHI et al, 2000; GINLEY et al, 2011).

Bateria de lítio não recarregáveis: possuem alta densidade de energia, longa vida útil e capacidade. Estão incluídas nesse grupo as baterias de lítio-manganês (LiMnO_2), utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis, como câmeras digitais e brinquedos eletrônicos, devido à sua estabilidade e alta eficiência. Bateria de lítio de dióxido de manganês (Li-MnO_2), comumente utilizada em relógios, dispositivos médicos e câmeras de segurança, possuem uma excelente taxa de descarregamento e é estável em várias temperaturas. Bateria de lítio de óxido de cobalto (LiCoO_2), comumente encontrada em celulares e dispositivos portáteis, embora também seja mais cara, oferecem alta densidade de energia, mas podem ser mais suscetíveis a aquecimento excessivo e instabilidade se não forem manuseadas corretamente. E a bateria de lítio de ferro-fosfato (LiFePO_4), que embora mais comum em baterias recarregáveis, as versões não recarregáveis são usadas em alguns dispositivos industriais e em aplicações de segurança devido à sua estabilidade térmica e segurança. Conseguem operar em uma ampla faixa de temperaturas (BOCCHI et al, 2000; GINLEY et al, 2011; VIAN et al, 2021).

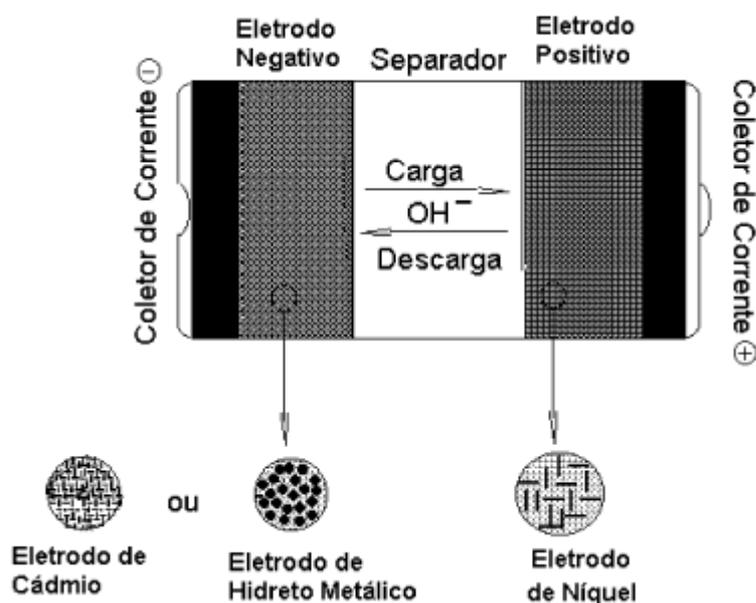
Baterias de chumbo-ácido são as mais comuns e amplamente utilizadas. Elas são formadas por placas de chumbo e ácido sulfúrico, que quando interagem entre si geram uma corrente elétrica. Durante o processo de recarga a reação química é, então, invertida. Ainda é muito encontrada em automóveis a combustão para dar a partida, acender os faróis, ligar o rádio, ou outras funções de partida. Também são usadas em telecomunicações, na indústria, controle de processos, sinalização ferroviária, óleo e gás, subestações, energia eólica e sistemas de energia solar off grid. São relativamente baratas e confiáveis, mais econômicas em termos de manutenção do que os motores térmicos, adequadas para utilização em interiores devido às suas baixas emissões de tóxicos, mas possuem uma vida útil limitada, em torno de 3 anos, e o manuseamento incorreto pode causar riscos de queimaduras ou possíveis incêndios (GINLEY et al, 2011; JUNIOR, 2023; VIAN et al, 2021).

Baterias de níquel-cádmio (NiCd) são as baterias recarregáveis mais antigas (Figura 3). Foi primeiramente proposta pelo sueco Waldemar Jungner em 1899, e são utilizadas em câmeras, lanternas e dispositivos mais antigos. Possuem uma alta taxa de carga e descarga, podem ser recarregadas muitas vezes, já que possuem uma longa vida útil. Apresentam bom desempenho em baixas temperaturas, armazenagem e transporte simples, além de grande variedade de formas e tamanhos. E por isso são mais baratas. Contudo são menos eficientes e menos seguras. A sua utilização

diminuiu muito ao longo dos anos devido aos metais tóxicos que não podem ser jogados no meio ambiente, inclusive alguns países até limitaram o uso desse tipo de bateria devido à toxicidade ao meio ambiente (AMBROSIO et al, 2007; JUNIOR, 2023).

Bateria de níquel-metal-hidreto (NiMH) é uma alternativa mais moderna às baterias de níquel-cádmio, com uma maior capacidade de armazenamento e alta densidade de energia. Possuem baixo efeito de memória, podem ser recarregadas centenas de vezes antes de perderem significativamente a sua capacidade, não precisam ser descarregadas completamente antes de uma nova recarga e são menos tóxicas do que as baterias de níquel-cádmio, por tanto mais seguras. Porém a vida útil das baterias de NiMH (Figura 3) normalmente é de menos de 1000 ciclos, um valor baixo comparado aos outros tipos de baterias. É utilizada em diversos dispositivos, como veículos híbridos, computadores, câmeras digitais, consoles de jogos portáteis, além de ferramentas elétricas (AMBROSIO et al, 2007).

Figura 3 - Esquema de eletrodos e separador em bateria de NIMH e NiCd

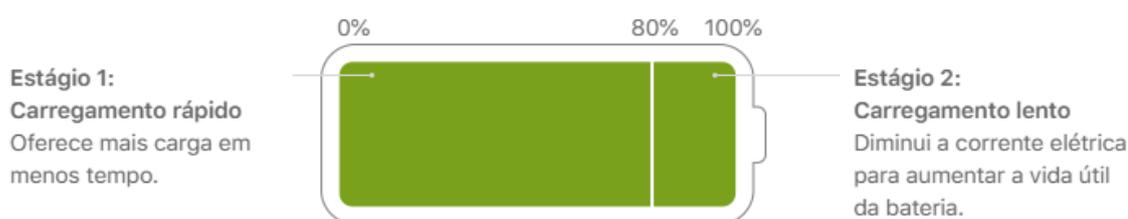


Fonte: Ambrosio *et al.*, 2007.

Baterias de íon-lítio (Li-ion) são as recarregáveis mais utilizadas no mercado atualmente em dispositivos portáteis como smartphones (Figura 4 e Figura 5), laptops, tablets e câmeras. Além de drones, alarmes de segurança, carros elétricos e sistemas de energia solar. São leves, possuem alta densidade de energia, uma longa vida útil, baixa manutenção, menos sensível a altas temperaturas e não necessita de descarga

completa deliberada. Mas também são relativamente caras, além do eletrólito delas poderem apresentar maior inflamabilidade. Mesmo possuindo uma janela de tensão operacional mais limitante, são menos poluentes quando comparada as de chumbo-ácida (GINLEY et al, 2011; VICENTE, 2018). As baterias de lítio ferrofosfato (LiFePO₄), por exemplo, comprovaram ter um bom desempenho eletroquímico com baixa resistência em uma pesquisa feita na Universidade do Texas, ainda em 1996, introduzindo o fosfato em escala nanométrica (BENTO, 2022).

Figura 4 – Modelo de funcionamento de uma bateria em um Iphone



Fonte: Apple, 2025.

Figura 5 - Bateria de íon-lítio smartphones atuais



Fonte: Reda, 2020.

Bateria de fosfato de ferro-lítio (LiFePO₄) é um tipo de bateria de lítio que é recarregável, selada e isenta de manutenção. É utilizada em vários dispositivos eletrônicos, como veículos Tesla e sistemas solares *off grid*. É uma opção mais segura e durável em relação às baterias somente de íon-lítio, chegando a durar de 10 a 15 anos. São menos tóxicas, mais baratas e duram mais do que outras baterias. Possuem alta densidade energética, capazes de fornecer tensão constante, são estáveis e têm um ótimo desempenho eletroquímico. São seguras pois quando são

sujeitas a colisão ou curto-circuito, elas não explodem ou pegam fogo, reduzindo significativamente qualquer chance de dano, oferecendo estabilidade térmica e química superior (GINLEY et al, 2011; VIAN et al, 2021).

Baterias de íon de sódio (Na-ion) são semelhantes às baterias de íon de lítio, mas usam o sódio em substituição ao lítio. Elas estão sendo desenvolvidas como alternativas mais baratas, já que o sódio é mais abundante, podendo ser extraído da água do mar, e por isso, é mais barato que o lítio. Possuem menor risco de incêndio por ter eletrólitos com um ponto de fulgor mais alto. Entretanto, elas armazenam menos energia por quilo do que as de íon-lítio, o que faz com que elas sejam mais pesadas, além de ter uma recarga mais lenta e capacidade de armazenamento de energia menor. Pesquisadores do Instituto Avançado de Ciência e Tecnologia da Coreia (KAIST) estão trabalhando em um projeto para permitir que elas sejam recarregadas em poucos segundos. Para isso eles combinaram o ânodo de uma bateria de sódio com um cátodo feito de um material especial usado em capacitores de alto desempenho (CHOI et al, 2024). Pesquisadores brasileiros também estão no mesmo campo de pesquisa: uma equipe da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas (Feec-Unicamp) em parceria com a empresa WEG trabalha no desenvolvimento do primeiro protótipo de uma bateria de sódio nacional (REAL et al, 2022). Tudo isso em um mercado onde fabricantes chineses dominam o mercado com baterias comerciais que possuem essa tecnologia e já equipa alguns veículos elétricos da marca BYD (BYD, 2025).

Baterias de fluxo são dispositivos que armazenam energia química em tanques separados. Os eletrólitos dentro dos tanques são bombeados para uma célula central, onde reagem entre si, gerando eletricidade. Podem armazenar grandes quantidades de energia e conseguem recarregar muito rapidamente, sendo por tanto uma alternativa promissora para o armazenamento de energias renováveis. Com uma longa vida útil, que permite um número enorme de recargas sem perder significativa capacidade, mas exigem manutenção periódica do eletrólito para a restauração da capacidade (LISBOA, 2019; NEVES, 2022).

2.2.3 Células a combustível

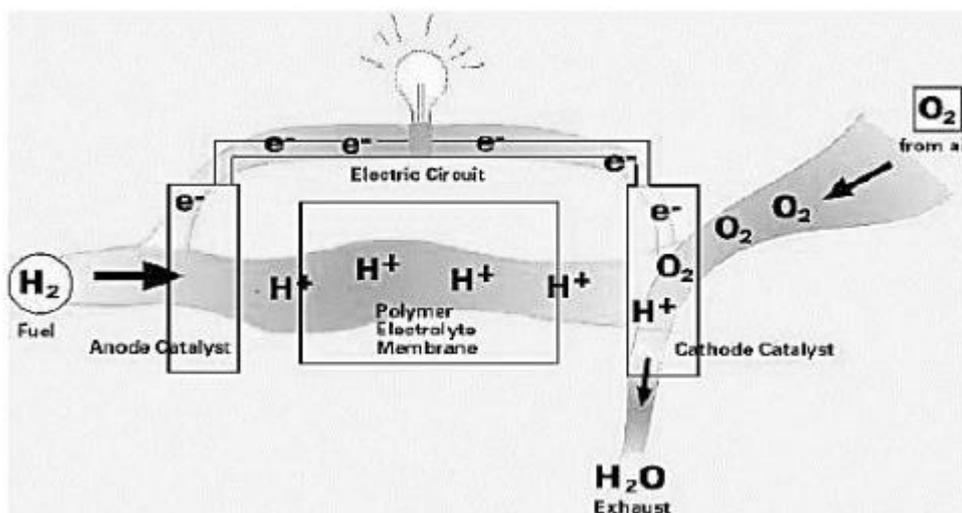
Células a combustível são dispositivos que convertem a energia química de um combustível diretamente em energia elétrica por meio de uma reação eletroquímica, sem a necessidade de combustão. Diferente das baterias, que armazenam energia, as células a combustível geram eletricidade continuamente enquanto houver suprimento de combustível e oxidante (JUNIOR et al, 2022).

Os componentes principais de uma célula a combustível (Figura 6) são o ânodo, que é o eletrodo negativo onde ocorre a oxidação do combustível, que geralmente é o hidrogênio, em um processo no qual os elétrons são liberados. E o cátodo, que é o eletrodo positivo onde ocorre a redução do oxidante, que na maioria das vezes é o oxigênio, e é onde os elétrons são consumidos. Dessa forma, o hidrogênio se combina com o oxigênio para formar água, gerando eletricidade como subproduto, e o eletrólito é o meio condutor de íons que permite o movimento deles entre o ânodo e o cátodo, porém impedindo a passagem de elétrons. E por fim, há ainda um catalisador que acelera as reações químicas nos eletrodos sem ser consumido no processo (JANNUZZI, 2002; JUNIOR et al, 2022).

A reação global em uma célula a combustível que utiliza hidrogênio e oxigênio é:



Figura 6 - Esquema de princípio de funcionamento de uma célula de combustível



Fonte: Jacinto *et al.*, 2022.

As células a combustível têm diversas vantagens, como alta eficiência, emissão zero ou baixa de poluentes, dependendo do combustível usado. Possuem também operação silenciosa e flexibilidade de combustíveis. No entanto, enfrentam alguns desafios, incluindo custo de produção, já que é uma tecnologia nova, não é produzida em grande escala e necessita de metais nobres como a platina, que é um dos metais mais caros e raros do mundo. Tendo, por tanto, pouca infraestrutura de abastecimento de matéria prima e baixa durabilidade (JUNIOR et al, 2022; RODRIGUES et al, 2018; WENDT et al, 1999).

Existem alguns tipos de células a combustível, que vão variar de acordo com o tipo de combustível utilizado e a aplicação desejada, sendo classificadas pelo tipo de eletrólito usado e pela temperatura de operação (MOSTAGI et al, 2011; RODRIGUES et al, 2018):

Célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC): é um dispositivo que utiliza a energia química do hidrogênio para gerar eletricidade. O processo ocorre através de uma membrana de polímero como eletrólito, que conduz prótons do ânodo ao cátodo, enquanto bloqueia elétrons. Os elétrons, então, são retirados através de um processo de eletrólise em água. O hidrogênio é combinado com o oxigênio, que pode ser retirado da atmosfera e essa reação não representa uma combustão, sendo, por tanto, um processo não poluente. Suas vantagens incluem serem robustas e de fácil acionamento e desligamento, são silenciosas e podem ser montados de forma modular, além de serem uma alternativa promissora para motores a combustão. É frequentemente usada em aplicações de transporte e portáteis, veículos movidos a hidrogênio, geração de energia em residências e indústrias e em telecomunicações. Porém, apresentam alguns desafios como estabilidade química da membrana polimérica nas condições de operação da célula e a formação de peróxidos que atacam a superfície da membrana (ALMEIDA et al, 2016; MOSTAGI et al, 2011).

Célula a combustível de ácido fosfórico (PAFC): também utiliza a energia química do hidrogênio para gerar eletricidade. A diferença está em usar ácido fosfórico líquido como eletrólito. É um sistema eletroquímico que não representa combustão, pode operar em temperaturas entre 150 e 220°C, não necessita de gás oxigênio puro para funcionar e pode ser aplicado em residências, comércios, indústrias, transportes, equipamentos eletroeletrônicos, além de aplicações em hospitais, bancos, empresas de processamento de dados, automóveis, ônibus, trens, navios e até aviões.

Apresenta algumas vantagens como a capacidade de reaproveitar o calor produzido para a geração de vapor de processo e tem baixa volatilidade do eletrólito, o que torna o eletrocatalisador praticamente insensível ao envenenamento por carbono. Apesar de tudo isso, tem condutividade elétrica baixa em baixas temperaturas, tem um custo inicial alto e o monóxido de carbono (CO) pode prejudicar a eficiência e o desempenho da PAFC (JUNIOR et al, 2022; MOSTAGI et al, 2011; RODRIGUES et al, 2018).

Célula a combustível de carbonato fundido (MCFC): esse tipo de célula também usa energia química do hidrogênio para produzir eletricidade, porém usando uma mistura de carbonatos alcalinos fundidos como o eletrólito (Figura 5). Eles formam um sal condutor de íons, também chamado de íon carbonato, e não precisam de catalisadores de metais nobres para as reações de oxirredução eletroquímica. É uma célula da segunda geração, que tem sido objeto de vários estudos e programas de desenvolvimento. Ela trabalha em temperaturas entre 600 e 700 °C, tem baixo custo de desenvolvimento de infraestrutura de instalação, e o calor residual produzido pode ser reaproveitado para cogeração. São limpas, silenciosas e eficientes, podem operar por longos períodos, além de serem mais eficientes que as máquinas térmicas. Apesar de tudo isso, ela necessita de um longo tempo de funcionamento para atingir a potência desejada, possui um elevado custo atual em comparação com as fontes de energia convencionais, além de problemas e custos associados ao transporte e distribuição de novos combustíveis como o hidrogênio. É adequada para energia elétrica em residências, comércios, indústrias e em sistemas estacionários e sistemas de cogeração, que podem aproveitar o calor residual gerado pelo próprio sistema. Além de também conseguir ser utilizado em veículos elétricos, onde a reação química entre o hidrogênio e o oxigênio gera energia elétrica (JUNIOR et al, 2022; MOSTAGI et al, 2011; RODRIGUES et al, 2018).

Célula a combustível de óxido sólido (SOFC): é um dispositivo que gera eletricidade a partir da oxidação de um combustível, com óxidos sólidos como eletrólito ou cerâmica condutora. Apresenta vantagens como alta eficiência na produção de energia e calor, boa estabilidade a longo prazo, baixas emissões, grande flexibilidade de combustível, além de operar em temperaturas muito altas e por isso dificultar os tipos de materiais que podem ser usados, gerando problemas de compatibilidade mecânica e química e alto custo dos materiais utilizados em sua construção. Possui aplicabilidade nos setores de geração de energia elétrica em

residências, indústrias e unidades estacionárias, além de veículos automotores (JUNIOR et al, 2022; MOSTAGI et al, 2011; RODRIGUES et al, 2018).

2.2.4 Supercapacitores

Também são conhecidos como ultracapacitores, capacitores eletroquímicos, ou ainda, capacitor de camada dupla. Os supercapacitores (Figura 7) são dispositivos de armazenamento de energia que podem armazenar e liberar grande quantidade de energia e em um curto tempo. Apresentam alta densidade de potência e longa vida útil, armazenando mais energia por unidade de volume ou massa do que os capacitores eletrolíticos. Eles representam um equipamento intermediário entre as baterias e os capacitores tradicionais, combinando algumas das melhores características de ambos. Possuem uma tecnologia promissora para muitas aplicações onde a alta potência e a longa vida útil são críticas, complementando ou até substituindo as baterias em certas situações (REZENDE et al, 2022).

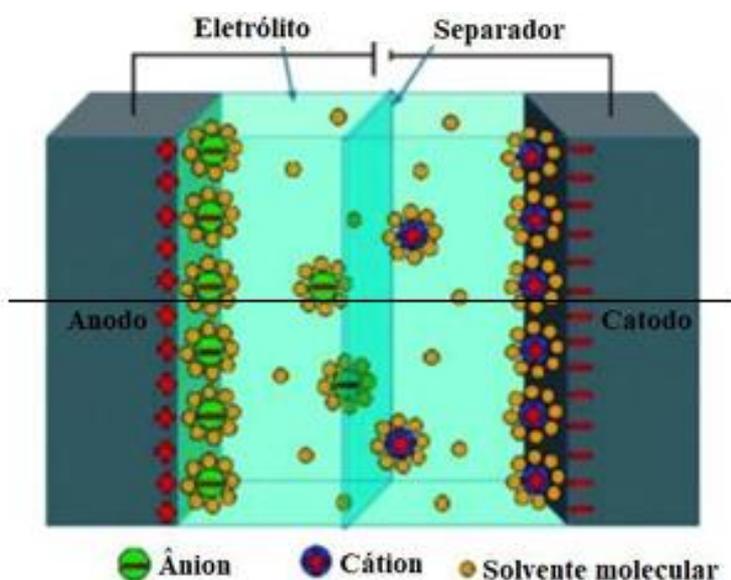
Eles são formados por eletrodos, que geralmente são feitos de materiais com alta área de superfície, como carbono ativado, grafeno ou óxidos metálicos, e que permitem o armazenamento de uma grande quantidade de carga elétrica. O eletrólito é um líquido ou gel que permite a movimentação de íons entre os eletrodos. E pode ser aquoso ou orgânico, dependendo da aplicação. Já o separador, consiste em uma membrana que impede o contato direto entre os eletrodos evitando curtos-circuitos, enquanto permite a passagem de íons (REZENDE et al, 2022). Os supercapacitores armazenam energia de duas maneiras principais: capacitância eletrostática, que é similar aos capacitores tradicionais, onde a energia é armazenada através da separação de cargas em uma interface condutor-eletrólito. E capacitância eletroquímica, ou pseudocapacitância, no qual envolve transferências de carga *faradaicas*, ou redox, nos eletrodos, que permitem uma maior densidade de energia comparada aos capacitores eletrostáticos (REZENDE et al, 2022; SELLA et al, 2021).

Algumas vantagens dos supercapacitores são a alta densidade de potência, eles podem liberar energia muito rapidamente, e por isso são ideais para aplicações que requerem picos de potência. Longa vida útil, conseguindo suportar centenas de milhares a milhões de ciclos de carga e descarga sem perda significativa de desempenho. Recarga rápida, podem ser carregados em questão de segundos a minutos. E baixa manutenção, geralmente não exigem manutenção frequente e têm

uma vida útil prolongada (REZENDE et al, 2022; SELLA et al, 2021). Já algumas desvantagens são: a baixa densidade de energia, quando comparados às baterias. Armazenam menos energia por unidade de peso ou volume, o que os torna menos adequados para aplicações que requerem armazenamento de energia a longo prazo. E a autodescarga, eles tendem a perder energia mais rapidamente do que as baterias quando não estão em uso (REZENDE et al, 2022; SELLA et al, 2021).

Algumas aplicações estão presentes no mercado automotivo, fornecendo energia para sistemas de frenagem regenerativa, sistemas *start-stop* e aceleração em veículos elétricos e híbridos. No mercado de eletrônicos, são muito utilizados em dispositivos que requerem picos de potência, como câmeras digitais e flashes. No mercado de energias renováveis, são presentes no armazenamento temporário de energia em sistemas de energia solar e eólica. E na Indústria, são usados em sistemas de *backup* de energia e fontes de alimentação ininterrupta (UPS) (REZENDE et al, 2022; SELLA et al, 2021).

Figura 7 - Esquema representativo de um supercapacitor do tipo EDLC



Fonte: Rezende et al., 2022.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa bibliográfica, de natureza qualitativa com o objetivo de levantar informações através de análise de artigos científicos, livros acadêmicos e/ou materiais semelhantes, para abordar, analisar, comparar, discutir, com dados da literatura (artigos científicos, teses e dissertações) as aplicações de nanomateriais em baterias e sistemas de armazenamento de energia com ênfase em baterias para veículos elétricos.

A metodologia adotada teve como objetivo identificar, selecionar e interpretar criticamente a produção científica existente sobre a aplicação da nanotecnologia voltada ao armazenamento de energia. A coleta de dados foi realizada por meio da consulta a bases de dados científicas reconhecidas, como ScienceDirect, Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar. Foram utilizados descritores específicos, tais como "nanotecnologia", "materiais avançados", "armazenamento de energia", "nanomateriais", "supercapacitores", e "baterias de íon-lítio", "veículos elétricos", entre outros, isoladamente e em combinação, a fim de garantir uma cobertura abrangente e direcionada da literatura.

Como critérios de inclusão, priorizaram-se publicações com data a partir de 2018, com ênfase em artigos indexados em periódicos de alto impacto, revisões sistemáticas e trabalhos que abordassem inovações tecnológicas com aplicabilidade direta em dispositivos de armazenamento energético. A análise das obras selecionadas foi conduzida de forma sistemática e comparativa, visando à identificação de tendências, abordagens metodológicas predominantes, desafios técnicos e avanços significativos no campo. Essa abordagem permitiu a construção de um referencial teórico robusto, capaz de subsidiar a compreensão crítica do estado da arte e apontar caminhos para futuras investigações na área.

A opção pela pesquisa bibliográfica justifica-se pela vasta quantidade de estudos e publicações existentes sobre nanotecnologia aplicada à ciência dos materiais e ao armazenamento de energia, permitindo o acesso a diferentes perspectivas, avanços recentes e abordagens metodológicas já consolidadas. Considerando a complexidade e a interdisciplinaridade do tema, a revisão da literatura mostrou-se essencial para a compreensão aprofundada dos fundamentos teóricos, das aplicações tecnológicas emergentes e dos desafios enfrentados na área.

Além disso, a pesquisa bibliográfica possibilitou uma abordagem crítica e reflexiva, sem a necessidade de experimentação laboratorial direta, o que se mostrou apropriado dentro dos limites temporais e estruturais deste trabalho. Dessa forma, a metodologia escolhida não apenas garantiu o embasamento teórico necessário, como também contribuiu para a identificação de lacunas na literatura que podem orientar futuras investigações experimentais.

4 ANÁLISE DA LITERATURA CIENTÍFICA

4.1 Fundamentos da nanotecnologia

A nanotecnologia é o campo da ciência e engenharia dedicado ao estudo, manipulação e aplicação de materiais e dispositivos, no qual tenham pelo menos uma de suas dimensões em escala nanométrica. Esses materiais apresentam propriedades físicas, químicas e biológicas únicas, devido ao seu tamanho e área de superfície extremamente reduzidos em relação aos materiais macroscópicos (NOTARIANNI et al, 2016).

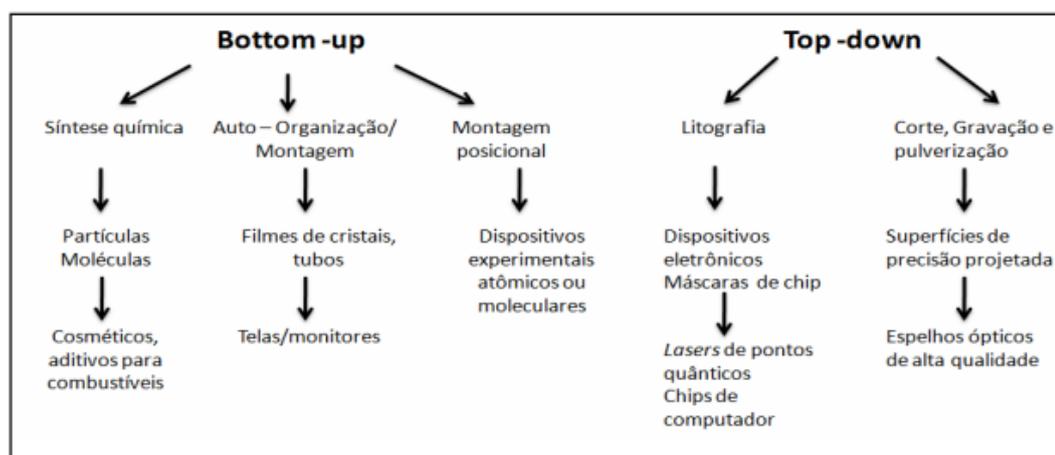
Os nanomateriais podem ser produzidos a partir de uma variedade de materiais, incluindo metais, cerâmicas, polímeros e compostos orgânicos. São usados em diversas aplicações, desde a fabricação de eletrônicos, até na área da medicina, da indústria, da construção civil, energia renovável, entre outros. Algumas das propriedades únicas dos nanomateriais incluem alta reatividade química, alta condutividade elétrica e térmica, alta resistência mecânica e óptica, além de apresentar um comportamento diferente devido à mecânica quântica, o que torna esses materiais muito promissores para aplicações futuras nas diversas áreas já mencionadas (FECHINI, 2020; FINDIK, 2021; JEEVANANDAM et al, 2018). Esses processos podem ser feitos de várias maneiras, e por isso, classificamos a nanotecnologia dependendo do enfoque (FECHINI, 2020):

Quanto à maneira de fabricação elas podem ser classificadas em processos de *Top-down* ou *Bottom-up*. No método *Top-down* (Figura 8) começa-se com um material macroscópico ou microscópico e o reduz até a escala nanométrica por meio de técnicas físicas ou químicas. Entre essas técnicas temos a litografia, um processo no qual é utilizado luz, elétrons ou íons para esculpir padrões em materiais, criando circuitos nanométricos. É o caso de litografia óptica, litografia por feixe de elétrons ou litografia por nanoimpressão. Essa técnica é muito usada na fabricação de semicondutores e *microchips*. Outra técnica é a usinagem e moagem mecânica, processo de cortar fisicamente um material, como nos métodos de fresamento, torneamento e moagem para reduzir o tamanho dos materiais. É utilizada na produção de pó nanométricos para compósitos e revestimentos. Uma terceira técnica usada é a erosão por feixe de íons (*Ion Beam Milling*), que remove camadas de material com precisão atômica usando um feixe de íons, e é aplicada na fabricação de MEMS

(*Microelectromechanical Systems*) e NEMS (*Nanoelectromechanical Systems*). A última técnica é a eletrodeposição e corrosão controlada, processo no qual se adiciona ou remove material de superfícies por meio de processos eletroquímicos. É empregada na criação de nanoestruturas metálicas e na modificação de superfícies (FECHINI, 2020; FINDIK, 2021; THE ROYAL SOCIETY, 2004).

Já no método *Bottom-up* (Figura 8), o processo se inverte, há a montagem de átomos ou moléculas individuais para formar estruturas maiores e funcionais, permitindo maior controle estrutural e novas propriedades. As técnicas empregadas aqui são Auto-organização molecular (*Self-assembly*), processo no qual as moléculas se organizam espontaneamente em padrões ordenados devido a interações químicas e físicas, e é usado na fabricação de nanodispositivos eletrônicos e biomédicos. Síntese química de nanopartículas, são reações químicas controladas que produzem nanopartículas com características específicas, aplicada na fabricação de nanocatalisadores, nanotubos de carbono e fármacos. Deposição por Camada Atômica (ALD - *Atomic Layer Deposition*), deposita filmes finos camada por camada com precisão atômica, utilizado em revestimentos ópticos e semicondutores. E por último, nanolitografia por DNA e biomoléculas, no qual é utilizado sequências de DNA para criar padrões nanométricos e guiar a formação de nanoestruturas, técnica empregada em nanotecnologia biomédica e de biossensores (Fechini, 2020; Findik, 2021; The Royal Society, 2004).

Figura 8 - Métodos de manufatura em nanoescala: *top-down* e *bottom-up*



Fonte: The Royal Society, 2004.

A nanotecnologia tem o potencial de revolucionar dispositivos de armazenamento de energia, oferecendo melhorias significativas em desempenho, eficiência e sustentabilidade (FINDIK, 2021; STÊNIO et al, 2011). Alguns dos principais impactos da nanotecnologia são:

Aumento da capacidade de armazenamento através do uso de nanomateriais, como nanotubos de carbono, grafeno (REAL et al, 2022; EDELSTEIN, 2016) e nanofios, que conseguem aumentar a capacidade de armazenamento de baterias e supercapacitores (EDELSTEIN, 2016). Esses materiais possuem uma alta área de superfície e propriedades eletrônicas únicas que permitem armazenar mais energia em um volume menor. Isso pode ser feito usando materiais nanoestruturados que conseguem acomodar mais íons de lítio ou outros íons de armazenamento de energia, aumentando a densidade de energia das baterias (JEEVANANDAM et al, 2018).

Melhorias na taxa de carregamento e descarregamento permitem a difusão mais rápida de íons, o que melhora as taxas de carga e descarga das baterias. O que resulta em tempo de recarga mais rápidos e maior eficiência no momento do uso. Além disso, materiais nanoestruturados, como o grafeno, possuem alta condutividade elétrica que reduzem as perdas de energia durante os processos de carga e descarga (JEEVANANDAM et al, 2018; REAL et al, 2022).

Aumento da vida útil, já que os eletrodos feitos de nanomateriais podem sofrer menos degradação ao longo do tempo devido à sua capacidade de acomodar as mudanças de volume que ocorrem durante os ciclos de carga e descarga. O que ocasiona no aumento da vida útil das baterias. Por outro lado, os nanorevestimentos (MACIEIRA, 2020) também podem proteger os eletrodos e outros componentes das baterias contra a corrosão e outros tipos de degradação, prolongando também, a vida útil do dispositivo (ROSSO, 2020; WAKAMATSU et al, 2010).

Redução de custos no longo prazo devido a eficiência energética e a capacidade de armazenamento aumentadas, mesmo que os materiais nanoestruturados sejam inicialmente mais caros. Também podem permitir novos processos de fabricação que são mais eficientes e menos dispendiosos (BAIG et al, 2021; JEEVANANDAM et al, 2018). E por último, pesquisas em nanomateriais estão focadas em encontrar alternativas menos tóxicas e mais sustentáveis para os materiais atualmente usados em baterias. A estrutura em nanoescala dos materiais pode facilitar processos de reciclagem mais eficientes, reduzindo o impacto ambiental dos dispositivos de armazenamento de energia (FINDIK, 2021).

4.2 Aplicações da nanotecnologia na ciência e engenharia dos materiais

A nanotecnologia é uma tecnologia que permite manipular átomos e moléculas, beneficiando as propriedades desejadas. Os métodos de síntese, isto é, processos que combinam substâncias simples para formar produtos mais complexos, também podem ser aplicados como na evaporação térmica, pulverização catódica (*sputtering*), ou litografia. Já sobre alguns exemplos de métodos químicos, podemos citar Sol-gel, deposição química de vapor (CVD), deposição por camada atômica (ALD) e síntese hidrotermal. Sobre os métodos biológicos, temos o uso de organismos vivos ou biomoléculas para sintetizar nanomateriais, que são frequentemente mais ecológicos (FINDIK, 2021; STÊNIO et al, 2011; WAKAMATSU et al, 2010).

Técnicas de caracterização, ou seja, o processo de avaliar as propriedades físicas e químicas de uma amostra, é fundamental para identificar a composição e a presença de impurezas e selecionar as propriedades desejadas. É também necessária para garantir o cumprimento de regulamentações de segurança e toxicidade. Podem ser aplicadas através da microscopia de transmissão eletrônica (TEM), que permite visualizar a estrutura interna dos nanomateriais. Na microscopia de varredura eletrônica (SEM), utilizada para estudar a morfologia superficial. Na difração de raios X (XRD), para determinar a estrutura cristalina. Na espectroscopia de absorção de raios X (XAS), para estudar a estrutura eletrônica. E na espectroscopia *raman*, que caracteriza as vibrações moleculares e estrutura cristalina (BAIG et al, 2021; PEIXOTO, 2021).

Já quanto à aplicação e natureza dos materiais, podemos ter a nanotecnologia molecular, que usa moléculas individuais para projetar novos materiais e dispositivos, como máquinas moleculares. Nanotecnologia biomédica, que é aplicada em nanopartículas para entrega de fármacos, nanotubos para regeneração óssea e nanorrobôs para tratamentos específicos. Nanotecnologia eletrônica no desenvolvimento de transistores, *chips* e componentes eletrônicos menores e mais eficientes, como nos *chips* com transistores de escala nanométrica. Nanotecnologia energética, voltada para melhoria da eficiência energética, como células solares mais eficientes e baterias avançadas, foco deste trabalho. Nanotecnologia verde, já que promove o desenvolvimento de soluções sustentáveis, como filtros nanoestruturados

para purificação de água e catalisadores para reduzir poluentes (FINDIK, 2021; FIORAVANTE, 2009; RIVERA et al, 2014).

Quanto aos materiais utilizados podemos diferenciar entre: a tecnologia de nanopartículas, que são partículas com dimensões entre 1 e 100 nm para diferentes aplicações. Tecnologia de nanotubos, através de estruturas cilíndricas de carbono ou outros materiais, usadas em compósitos leves e resistentes (REAL et al, 2022). Tecnologia de nanocompósitos, que é uma combinação de nanomateriais com polímeros, metais ou cerâmicas para melhorarias em suas propriedades (CABRAL et al, 2009; GARCIA, 2003; WAKAMATSU et al, 2010). E tecnologia de filmes finos, no qual aplica-se camadas nanométricas em superfícies para melhorar características como resistência ao desgaste ou propriedades ópticas (PEIXOTO, 2021).

4.3 Sistemas de armazenamento de energia eletroquímica

4.3.1 Tipos de baterias utilizadas em veículos elétricos

Nos veículos elétricos as baterias mais comuns são as de íons de lítio, entre elas: NMC (Lítio Níquel-Manganês-Cobalto) é uma escolha comum por equilibrar custo e desempenho, além de oferecer uma boa densidade de energia (Figura 9). LFP (Lítio Ferro-Fosfato) é conhecida por ter uma durabilidade e segurança maior, mesmo que com densidade de energia um pouco inferior (Figura 10). NCA (Lítio Níquel-Cobalto-Alumínio) era a mais utilizada em veículos de luxo, porque proporcionava alta autonomia, e por tanto um custo maior, modelos da BMW utilizava esse modelo. Li-S (Lítio Enxofre), possui uma tecnologia promissora por ser capaz de oferecer maior densidade de energia, mas ainda está em desenvolvimento para aplicações em larga escala (ANTAGONISTA, 2025; DELGADO et al, 2022; NOCE, 2009; LEICHSENRING, 2023).

Para maximizar a capacidade e a vida útil, as baterias de veículos elétricos geralmente têm sistemas sofisticados de gerenciamento térmico e eletrônico, que monitoram e regulam a temperatura e a tensão das células da bateria para garantir um desempenho ótimo e minimizar o risco de danos ou falhas (LEICHSENRING, 2023; NOCE, 2009). A maioria dos carros já incluem na compra, um carregador que pode ser instalado na garagem do cliente e ligado diretamente ao seu próprio medido de energia. Mas existem também várias estações de carregamento públicas como nos

shoppings, supermercados e estacionamentos privados, muitas com estações de carregamento rápido. A velocidade de carregamento vai depender da capacidade da bateria, da potência da fonte de energia e do tipo de carregador utilizado. Em geral, as baterias de veículos elétricos oferecem uma opção mais limpa e eficiente em termos de energia para alimentar veículos, em comparação com os combustíveis fósseis. No entanto, o custo ainda é um fator importante a ser considerado, e a tecnologia de bateria está em constante evolução para melhorar a capacidade, a vida útil e o desempenho dos veículos elétricos (MARTÍNEZ, 2024).

4.3.2 Desafios e limitações atuais dos sistemas convencionais de armazenamento de energia

Atualmente são vários os desafios e limitações enfrentados pelos sistemas de armazenamento convencionais, entre eles os que afetam sua eficiência, durabilidade e principalmente a sustentabilidade. Sobre a capacidade e a densidade de energia algumas tecnologias, como as baterias de chumbo-ácido, têm baixa densidade energética, limitando a capacidade de armazenamento em larga escala, quando comparadas aos combustíveis fósseis (SOUZA et al, 2024). Por outro lado, baterias de íon-lítio, por exemplo, têm uma densidade de energia relativamente alta, mas ainda são inferiores a fontes como gasolina. Enquanto outras podem ainda exigir grandes áreas para instalação (Fortune Business Insights, 2025; SOUZA et al, 2024).

No quesito vida útil e degradação dos materiais, as baterias convencionais perdem capacidade com o tempo devido à degradação dos eletrodos e dos eletrólitos. Há ainda a formação de dendritos, pequenas deformações na superfície dos materiais devido ao atrito e dilatação dos materiais, como no caso das baterias de íon-lítio, em que pequenas estruturas metálicas podem crescer nos eletrodos, causando curto-circuito e falhas (ZHANG et al, 2025). Um outro ponto a considerar é a perda de energia durante o armazenamento que afeta a eficiência dos sistemas. Além disso, algumas tecnologias de armazenamento, como o hidrogênio, ainda têm eficiência limitada. Algumas baterias perdem energia na conversão e durante os ciclos de carga e descarga, enquanto outras perdem energia ao longo do tempo mesmo sem o uso (NOCE, 2009; ZHANG et al, 2025).

O tempo de recarga é outro fator limitante, já que muitas baterias levam horas para serem recarregadas completamente, além de apresentarem desafios na

integração do carregamento ultrarrápido. As tecnologias de supercapacitores, por exemplo, oferecem carregamento mais rápido, mas não armazenam energia suficiente para muitas aplicações (NOCE, 2009; ZHANG et al, 2025). Sobre os custos, podemos citar que as baterias modernas ainda têm um custo elevado devido aos materiais e processos de fabricação. A dificuldade na produção em larga escala de algumas tecnologias, como as baterias de estado sólido, também cria obstáculos para que sejam produzidas comercialmente (DELGADO et al, 2022; LEICHSENRING, 2023).

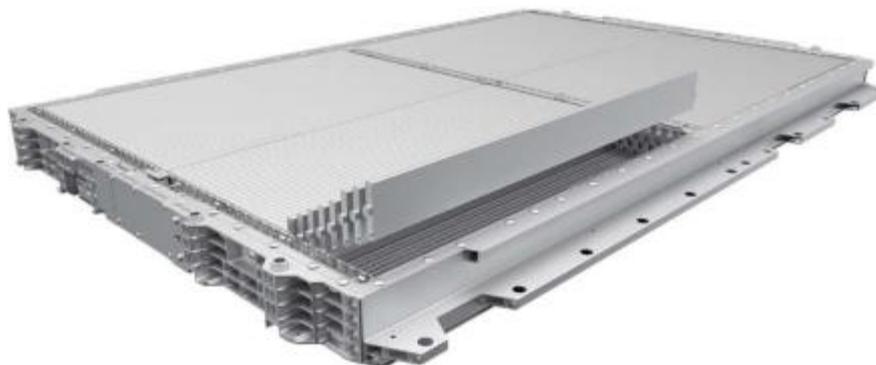
Segurança e risco de instabilidade é outra preocupação constante. O superaquecimento e risco de incêndio existente nas baterias de íon-lítio, devido a possibilidade de falhas térmicas que podem causar faíscas, curtos-circuitos ou sobrecarga, é motivo de alerta entre os consumidores. Além disso, alguns outros componentes das baterias são tóxicos e/ou inflamáveis, representando riscos ambientais e às pessoas (DELGADO et al, 2022; LEICHSENRING, 2023). Por último, o impacto ambiental e sustentabilidade é algo a se levar em conta. Existe uma grande dependência de metais raros para esse propósito como o lítio, cobalto e níquel, que são extraídos de maneira ambientalmente prejudicial e têm cadeias de suprimento limitadas. Além da dificuldade de reciclagem de todos os componentes que formam as baterias, que ainda é uma etapa complexa e cara, resultando em descarte inadequado e poluição ao meio ambiente ((DELGADO et al, 2022; NOCE, 2009; ZHANG et al, 2025).

Figura 9 - Esquema de banco de baterias de um carro elétrico da marca Audi



Fonte: Audi, 2024.

Figura 10 - Bateria Blade BYD, presente nos modelos BYD vendidos no Brasil



Fonte: BYD, 2025.

4.4 Aplicações de nanotecnologia em sistemas de armazenamento de energia

4.4.1 Nanomateriais para baterias de veículos elétricos

A aplicação de nanomateriais nas baterias para os veículos elétricos (VEs) tem sido fundamental para o desenvolvimento em larga escala desse tipo de carro, já que ele exige um banco de baterias, que ocupa mais espaço, quando comparados aos veículos a combustão. Por isso, é necessário que eles ocupem o menor espaço possível, possuam uma maior densidade energética, vida útil mais longa e eficiência no carregamento (FINDIK, 2021; FIORAVANTI, 2020; NOCE, 2009). Com base nessa aplicabilidade, podemos citar os principais nanomateriais já utilizados em baterias de VEs.

Nanomateriais para o ânodo, onde há o armazenamento de íons de lítio durante a carga: nesses casos os nanomateriais ajudam a aumentar a capacidade e a estabilidade. Como exemplos, temos os nanotubos de carbono (CNTs) que melhoram a condutividade elétrica e a estabilidade mecânica. O grafeno que possui alta condutividade elétrica e facilita a rápida movimentação de íons (EDELSTEINS, 2016; REAL et al, 2022). As nanoesferas de silício que substituem o grafite tradicional, aumentando a capacidade, mesmo ainda enfrentando desafios de expansão volumétrica (SILVA, 2024). E os nanofios de estanho que melhoram a capacidade, contudo, precisam de soluções para lidar com a degradação (FIORAVANTI, 2020; JUNIOR, 2014).

Nanomateriais para o Cátodo, lugar onde ocorre a liberação de íons de lítio durante a descarga: podemos citar, nanopartículas de óxidos metálicos, entre eles o LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , e o Níquel-Manganês-Cobalto (NMC), que melhoram a estabilidade e aumentam a vida útil da bateria. Além de grafeno e nanotubos de carbono, que aumentam a condutividade e permitem maior eficiência na liberação dos íons (JEEVANANDAM et al, 2018; REAL et al, 2022; SILVA, 2024).

Nanomateriais para o eletrólito, onde é conduzido os íons de lítio entre o ânodo e o cátodo: são utilizadas nanopartículas cerâmicas, como ZrO_2 , Al_2O_3 e SiO_2 , para formar o eletrólito, melhorando a estabilidade térmica e a segurança das baterias (WAKAMATSU et al, 2010). Também são utilizados eletrólitos sólidos nanoestruturados, como sulfetos, polímeros e óxidos, que tornam as baterias mais seguras e eficientes, porque não são inflamáveis, possuem menor risco de curto-circuito interno causado pelo crescimento de dendritos, suportam tensões e densidades de corrente mais altas e mais estáveis quimicamente e sofrem menos degradação ao longo dos ciclos de carga e descarga (FERASSO et al, 2022; JEEVANANDAM et al, 2018).

Já para os separadores, que impedem o contato direto entre ânodo e cátodo, temos as nanofibras de polímeros de fluoreto de polivinilideno (PVDF) e nanofibras de poliacrilonitrila (PAN), que conseguem aumentar a estabilidade térmica e evitam curtos-circuitos. E membranas de óxidos metálicos, como TiO_2 e Al_2O_3 , que permitem aumentar a segurança e reduzir a degradação (CABRAL et al, 2009).

Existem, ainda, algumas tendências e novas tecnologias em fase de testes, como é o caso de uma pesquisa feita com nanopartículas de chumbo usadas para aumentar a área de contato do eletrodo, permitindo, assim, maior capacidade de armazenamento de energia. Feita por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen) e do programa de pós-graduação em Tecnologia Nuclear da USP, em São Paulo, essa pesquisa levou a um novo tipo de bateria (Figura 11), que utiliza nanotecnologia combinada com células de hidrogênio, a parte transparente é uma membrana de troca de prótons que substitui o meio líquido de uma bateria convencional e a parte escura são as nano partículas de chumbo que constituem os eletrodos (SOUZA et al, 2024). Ela consegue ser mais leve, flexível e sustentável em comparação com as baterias tradicionais de lítio, permitindo uma maior capacidade de armazenamento de energia em um espaço menor, além da substituição da água por uma membrana plástica compacta que elimina os riscos

associados ao congelamento e explosão (SOUZA et al, 2024). As baterias de estado sólido com nanomateriais, também é uma promessa de maior segurança e densidade de energia. Os nanocompósitos híbridos integram diferentes materiais para maximizar desempenho e durabilidade. Esses materiais ajudam a criar baterias mais leves, duráveis e eficientes, acelerando a transição para veículos elétricos com maior autonomia e menor tempo de recarga (GARCIA, 2003).

Figura 11 - Protótipo da bateria flexível Ipen.



Fonte: Souza *et al.*, 2024.

4.4.2 Impacto da nanotecnologia na eficiência das baterias

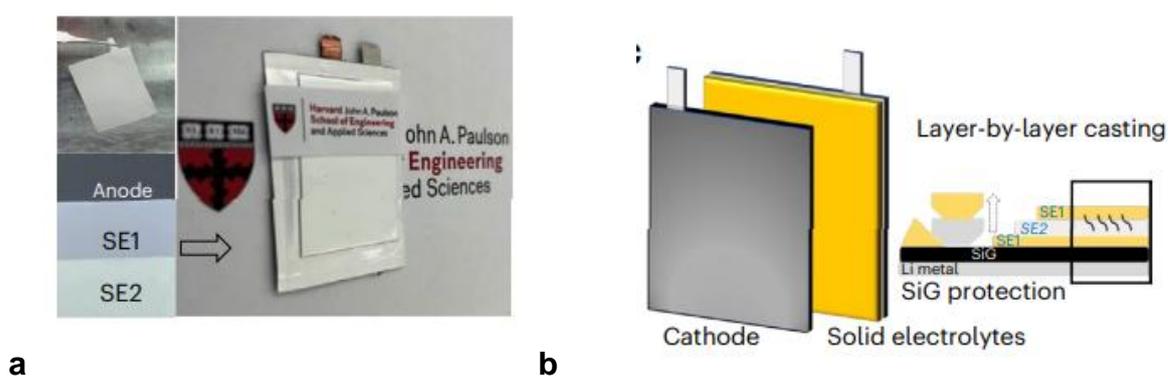
Um exemplo do desenvolvimento de eletrodos de nanotubos de carbono é da empresa francesa Nawa Technologies (ARANDA, 2020), que criou um eletrodo utilizando nanotubos de carbono alinhados verticalmente (VACNT). Essa nanoestrutura 3D oferece alta condutividade iônica, elétrica e térmica, potencialmente aumentando a energia da bateria em até 10 vezes, aumentando a capacidade de armazenamento em três vezes, aumentando a vida útil em cinco vezes, e reduzindo o tempo de recarga para minutos (CHOI et al, 2024; REAL et al, 2022; UTSUMI et al, 2024).

Sobre as baterias de lítio metálico de estado sólido, engenheiros de Harvard desenvolveram uma bateria de lítio metálico de estado sólido (Figura 12) capaz de ser recarregada em 10 minutos e suportar até 6.000 ciclos de carga e descarga. Essa

tecnologia aborda desafios como a formação de dendritos, estruturas que podem causar curtos-circuitos, utilizando uma estrutura multicamada que controla seu crescimento e melhora a segurança e eficiência das baterias (YE et al, 2022).

Além da pesquisa, já citada anteriormente, dos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen) no Brasil, que desenvolveram uma bateria significativamente mais leve e flexível que as convencionais, utilizando nanopartículas de chumbo fixadas em um tecido de carbono flexível. Todos esses avanços demonstram o impacto contínuo da nanotecnologia na melhoria das baterias, contribuindo para dispositivos mais eficientes, duráveis e adaptáveis às necessidades modernas (SOUZA et al, 2024).

Figura 12 - a: Fotografia do ânodo *slurry-cast* SiG; b: ilustração das camadas das células de bolsa.



Fonte: Ye et al., 2022.

4.5 Avanços da nanotecnologia em baterias de estado sólido

A nanotecnologia tem impulsionado avanços significativos nas baterias de estado sólido, com o objetivo de aumentar a eficiência, segurança e autonomia dos veículos elétricos. No quesito segurança, as baterias de estado sólido são mais resistentes a incêndios e vazamentos de líquido. Podem ter uma maior densidade energética, o que significa maior autonomia para os veículos elétricos, maior duração de vida útil, reduzindo assim a necessidade de trocar a bateria frequentemente, e permitem taxas de transferência de energia mais rápidas, o que pode reduzir significativamente os tempos de carregamento (YE et al, 2022). Dessa forma, os eletrólitos sólidos podem ser feitos a partir de materiais inorgânicos que ultrapassam os problemas de inflamabilidade dos orgânicos (LEICHSENDRING, 2023; VENTURA,

2025). Algumas empresas já envolvidas com esse tipo de pesquisa são a Nissan, Toyota, Mercedes-Benz, Solid Power, Sila Nanotechnologies, Factorial Energy, entre outras (LEICHSENRING, 2023; LEICHSENRING, 2025). Podemos destacar os seguintes exemplos:

A Toyota, em colaboração com a Idemitsu, está desenvolvendo baterias de estado sólido que prometem revolucionar o futuro dos veículos elétricos (Figura 13). Essa parceria busca aprimorar a eficiência energética e a autonomia dos automóveis elétricos, utilizando nanoestruturas de eletrólitos sólidos de sulfeto para otimizar o desempenho das baterias (LEICHSENRING, 2023).

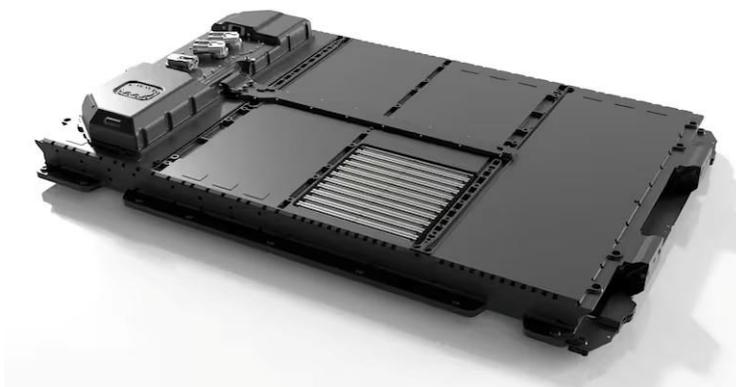
Figura 13 - Protótipo de bateria de estado sólido desenvolvido pela Toyota e Idemitsu



Fonte: Toyota, 2023.

A Mercedes-Benz iniciou testes em estrada com veículos equipados com baterias de estado sólido, utilizando lítio-metal no lugar do grafite, visando alcançar uma autonomia superior a 1.000 quilômetros por carga. Em parceria com a Factorial Energy, a montadora desenvolve baterias (Figura 14) com densidade energética gravimétrica de 450 Wh/kg, o que representa um aumento significativo em relação às baterias de íons de lítio atuais (CADENASER, 2025; LEICHSENRING, 2025).

Figura 14 - Bateria de estado sólido da nova geração da Mercedes-Benz



Fonte: Mercedes-Benz, 2025.

Pesquisadores do Instituto de Ciência dos Materiais do CSIC (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*) na Espanha, junto com pesquisadores da Universidade de Khalifa, em Abu Dhabi, criaram materiais organometálicos utilizando *metal-organic framework* de ferro com aldeído salicílico (denominaram MOF fe-tp). Ele é um material nanoestruturado composto por íons metálicos conectados por ligantes orgânicos. Quando integrado ao grafite dos ânodos das baterias de lítio podem dobrar o desempenho das baterias atuais sem comprometer a estabilidade ou aumentar os custos. Esse avanço é crucial para aumentar a autonomia dos veículos elétricos e promover a sustentabilidade ambiental (CASARIN, 2023; GABER et al, 2024).

No Brasil, um grupo da Universidade Federal do ABC (UFABC) e do Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) estão desenvolvendo materiais para a próxima geração de baterias. O foco está em eletrólitos sólidos poliméricos, através de uma película à base de ácido cítrico e germânio que oferecem maior segurança ao evitar vazamentos de substâncias tóxicas e explosões, adequadas para dispositivos menores e com formatos diversos. O material desenvolvido (Figura 15) é um filme transparente, leve e flexível de polietileno obtido por um método de fabricação simples, econômico e facilmente escalável para aplicação industrial. O tipo de polímero utilizado permaneceu o mesmo, mas foi alterado a estrutura eletrônica, elevando a condutividade e, também, reduziu em 50% a energia de ativação necessária para colocar os íons em movimento, o que permitiu diminuir o tempo para carregamento da bateria (FIORAVANTI, 2020).

Figura 15 - Película com germânio desenvolvida por pesquisadores da UFABC



Fonte: UFABC, 2020.

4.6 Impactos ambientais e sustentabilidade no uso de baterias de carros elétricos

Um dos principais objetivos para o desenvolvimento de veículos elétricos e baterias mais eficientes é devido ao impacto que essas tecnologias têm no meio ambiente, visto que, é uma substituição direta a veículos movidos a combustão, que são grandes emissores de gases do efeito estufa. Com base nisso, podemos destacar alguns impactos diretos que essas baterias apresentam ao meio ambiente (CASARIN, 2023; SOUZA et al, 2024).

A primeira é a redução de emissões de CO₂. Os veículos elétricos não emitem gases do efeito estufa durante seu uso. Comparados aos carros a combustão essa redução pode ser de até 50% ao longo do seu ciclo de vida, segundo um estudo da Rystad Energy (2023), que levou em conta todas as etapas do ciclo de vida dos veículos, incluindo a fabricação, montagem (Figura 16), manutenção, reabastecimento e produção de baterias. O estudo ainda aponta, que utilizando como exemplo a matriz elétrica prevista para a China nos próximos 20 anos os elétricos totalizaram 39 toneladas de CO₂ contra quase 85 toneladas de um carro a combustão. Além disso os VEs são abastecidos com energia elétrica, que pode vir de fontes limpas. Ao longo da vida útil de um carro elétrico, e considerando a sua produção, a emissão de carbono gerada é de até 68% menor que a de veículos movidos a combustão interna (Conselho Internacional de Transporte Limpo, 2021).

Figura 16 - Linha de montagem da chinesa BYD em Hefei.



Fonte: Getty Images, 2024.

Outro impacto está relacionado à própria eficiência energética. Motores elétricos convertem cerca de 85 a 90% da energia em movimento, enquanto os motores a combustão interna aproveitam apenas 30 a 40% do combustível (FGV energia, 2022). A poluição sonora é outro diferencial. VEs são muito mais silenciosos, já que não produzem ruídos e vibrações como os motores a combustão, reduzindo drasticamente a poluição sonora principalmente em aglomerados urbanos (FGV, 2022; SOUZA et al, 2024).

Contudo alguns impactos negativos aparecem quando analisamos a cadeia de produção. As baterias utilizam metais críticos como lítio, cobalto, níquel e grafite, cuja mineração pode causar desmatamento, contaminação de águas subterrâneas e impactos sociais, como trabalho infantil em algumas regiões do mundo (SOUZA et al, 2024). O cobalto, por exemplo, apresenta ligações com a exploração precária na República Democrática do Congo (BBC, 2019). O aumento na dependência das baterias, também pode fazer crescer a demanda por esses recursos naturais finitos.

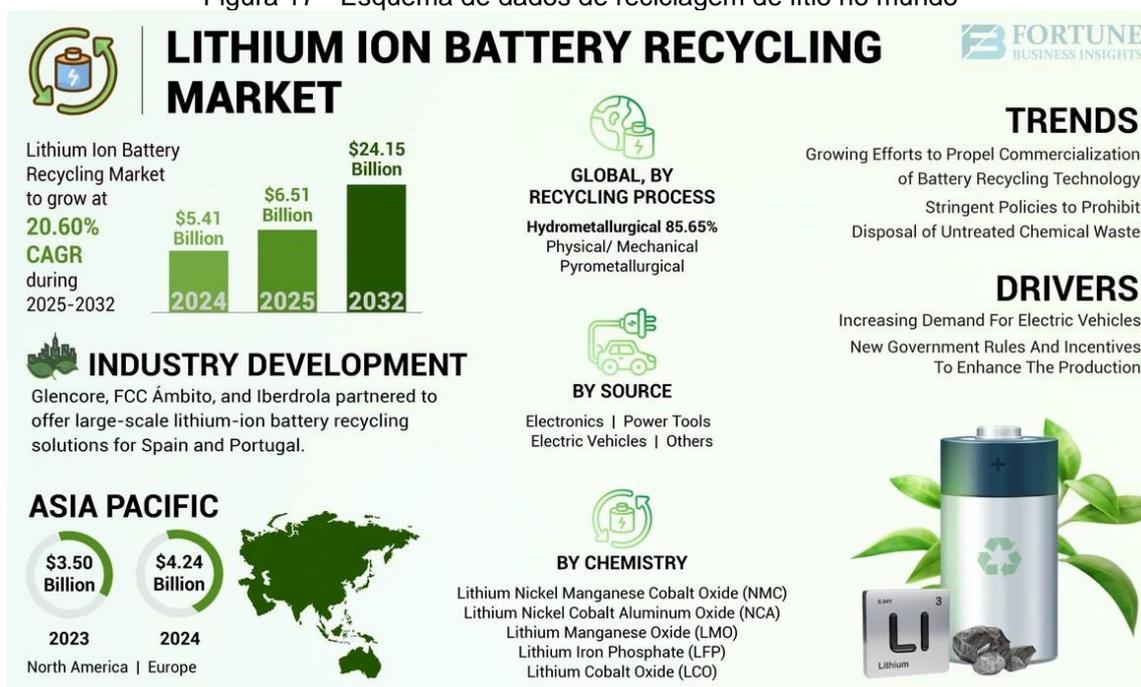
O alto consumo de energia na produção dos veículos e das baterias também é um fator importante. Durante a fabricação de baterias de lítio é consumida uma grande quantidade de energia, que nem sempre tem sua origem em fontes renováveis, gerando emissões no processo industrial. Além disso, países que possuem suas matrizes energéticas baseadas no carvão podem gerar mais poluentes na produção inicial das baterias (SOUZA et al, 2024).

Outro grande problema está no descarte dessas baterias. A reciclagem de baterias ainda enfrenta desafios tecnológicos e econômicos, resultando em descarte

inadequado e riscos ambientais (Figura 17). Para se ter uma ideia, apenas 5% das baterias de lítio são recicladas globalmente, enquanto o restante pode acabar em aterros de maneira inadequada, segundo a Fortune Business Insights (2025).

Apesar disso, algumas soluções já estão sendo implementadas por empresas como a Tesla, Volkswagen e Nissan, que estão investindo em reciclagem eficiente para recuperar metais preciosos das baterias usadas, já possuem programas de logística reversa para reutilizar ou reciclar baterias de VEs (MEU RESÍDUO, 2024; VENDITTI, 2021). A União Europeia possui regulamentação que exige que fabricantes recolham e reciclem baterias com destaque para o estabelecimento de metas de recolhimento de resíduos para os produtores de baterias portáteis de 63% até ao final de 2027 e 73% até ao final de 2030, e metas de valorização do lítio a partir de resíduos de baterias abrangendo 50% até ao final de 2027 e 80% até ao final de 2031, segundo o Regulamento UE 2023/1542 (2023).

Figura 17 - Esquema de dados de reciclagem de lítio no mundo



Fonte: Fortune Business Insights, 2025.

Outra solução é o desenvolvimento de novas tecnologias como baterias de estado sólido, que têm apresentado maior durabilidade e menor impacto ambiental. Baterias sem cobalto, por exemplo, reduzem os danos sociais e ambientais da mineração. Algumas alternativas na matéria prima das baterias como sódio-íon e lítio-

enxofre, que apresentaram menos dependência de metais raros (SOUZA et al, 2024; VENDITTI, 2021).

A utilização de fontes de energia limpa para recarga como solar, eólica ou hidrelétrica, é fundamental para o aumento da sustentabilidade dos VEs. Apesar de que países que possuem redes elétricas baseadas em carvão ou outros combustíveis fósseis podem reduzir esse benefício (ABSOLAR, 2023). Por fim, a regulação e responsabilidade corporativa é de suma importância para a sustentabilidade desse nicho. Governos e empresas estão criando políticas para incentivar cadeias de suprimentos mais sustentáveis e reciclagem obrigatória. Atualmente, o Brasil não possui uma legislação específica para a reciclagem e descarte de baterias de lítio provenientes de veículos elétricos. No entanto, algumas normas gerais e iniciativas em andamento abordam a questão, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, e define diretrizes para a gestão adequada de resíduos sólidos no país. E o CONAMA nº 401/2008, uma resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece limites para o teor de metais pesados em pilhas e baterias e define diretrizes para o gerenciamento ambientalmente adequado desses produtos após o uso. Porém, foca principalmente em pilhas e baterias portáteis. Outro exemplo é o Projeto de Lei nº 2.327/2021, em tramitação no Congresso Nacional, este projeto propõe alterações na PNRS para priorizar a reciclagem de baterias de veículos elétricos nos sistemas de logística reversa. Além de algumas iniciativas privadas já mencionadas (DELGADO et al, 2022).

4.7 Desafios na implementação de nanomateriais em baterias comerciais

Embora os nanomateriais tenham grande potencial para revolucionar as baterias, sua implementação comercial ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e ambientais. O avanço da pesquisa e o desenvolvimento de novos processos produtivos serão essenciais para viabilizar essa tecnologia em larga escala. Alguns desafios técnicos abrangem a questão da escalabilidade e fabricação em massa, porque a produção de nanomateriais requer processos avançados, como deposição química. Ou, ainda, nanotubos de carbono, por exemplo, não são materiais facilmente implementáveis para a produção em larga escala. Os métodos atuais são caros e

complexos, tornando a fabricação viável apenas em laboratórios. (IBERDROLA, 2025; UNICEP, 2024).

A estabilidade e a ciclagem são outro desafio, já que algumas baterias com nanomateriais sofrem degradação rápida ao longo dos ciclos de carga e descarga, reduzindo sua vida útil devido a alguns fatores como a expansão e contração significativas durante os ciclos de carga e descarga, processo no qual causa rachaduras, pulverização e perda de contato elétrico (BAIG et al, 2021). Os nanomateriais, com alta reatividade superficial, podem formar uma Interfase de Eletrólito Sólido (SEI) instável, que se rompe e se reconstrói constantemente, resultando em perda de íons de lítio e maior resistência interna (SAXENA et al, 2023). Óxidos metálicos, podem reagir com o eletrólito e causar a decomposição prematura da bateria. Nanopartículas podem se aglomerar devido a forças eletrostáticas e capilares, diminuindo a área ativa do eletrodo. Alguns nanomateriais, como sulfetos e óxidos, apresentam instabilidade térmica, o que pode acelerar reações secundárias e degradar o desempenho da bateria em temperaturas elevadas (ROSSO, 2020). E as nanoestruturas podem ser suscetíveis à formação de dendritos, no caso do lítio metálico por exemplo, levando a curtos-circuitos. A interação com eletrólitos também apresenta alguns desafios, porque muitos nanomateriais reagem de forma imprevisível com eletrólitos de baterias, impactando a eficiência e a segurança. E, portanto, é necessário desenvolver eletrólitos compatíveis para manter a performance ao longo do tempo (FECHINI, 2020; FINDIK, 2021; SAXENA et al, 2023).

Para garantir a eficiência e a segurança das baterias, é crucial que os nanomateriais sejam uniformemente distribuídos nas células da bateria, e isso exige um controle preciso sobre as propriedades do material, o que é difícil de alcançar em processos de fabricação em larga escala. A variabilidade nos tamanhos das partículas ou da estrutura dos nanomateriais pode, inclusive, comprometer o desempenho das baterias (BAIG et al, 2021; JEEVANANDAM et al, 2018). Mudanças estruturais podem ocorrer quando uma bateria é carregada e descarregada várias vezes, assim, o volume dos materiais ativos, como o lítio no ânodo, pode mudar drasticamente e causar rachaduras ou falhas estruturais nos nanomateriais. Isso reduz a vida útil da bateria e pode até levar a falhas catastróficas, como curtos-circuitos. Além disso, a formação de camadas indesejadas, SEI (*Solid Electrolyte Interphase*) em baterias de íons de lítio é um fenômeno comum, onde uma camada de material se forma no ânodo durante a carga e descarga. Essa camada pode ser mais instável quando os

nanomateriais estão envolvidos, o que pode resultar em menor desempenho ou vida útil reduzida (JEEVANANDAM et al, 2018; NOCE, 2009).

Os desafios técnicos apresentados refletem nos custos de produção. Nanomateriais, como grafeno e nanotubos de carbono, exigem processos de síntese caros e demorados. Por exemplo, a produção de grafeno de alta qualidade pode custar até milhares de dólares por grama, o que o torna inviável para baterias comerciais em grande escala. Além disso, a baixa disponibilidade de matéria-prima refinada em escala comercial encarece o produto final (BAIG et al, 2021). Essas dificuldades associadas a uma infraestrutura industrial limitada, que não possuem tecnologia de produção massiva de nanomateriais para baterias, e requerem novos equipamentos e adaptação das linhas de montagem, exigem investimentos altos. Tudo isso, resulta em um retorno de investimento mais demorado, que se torna estritamente dependente do desenvolvimento de tecnologias (BAIG et al, 2021; STÊNIO et al, 2011).

Os desafios ambientais são outros fatores limitantes a implementação de nanomateriais em baterias comerciais em larga escala. A sustentabilidade e o impacto ambiental na produção de nanomateriais, que podem gerar resíduos tóxicos e requerem processos químicos que ainda não são totalmente sustentáveis, é uma preocupação atual para empresas, governos e consumidores (CASARIN, 2023; SOUZA et al, 2024). Além da possibilidade de impactos ainda desconhecidos para o meio ambiente e a saúde humana (SILVA, 2013). Ainda há poucas regulamentações específicas para o uso de nanomateriais em baterias, e futuramente os governos podem impor restrições ao uso de certos materiais devido a possíveis riscos ambientais e de saúde humana (FERNANDES et al, 2008). Além disso, o reaproveitamento de baterias com nanomateriais ainda não é eficiente, e pode gerar desafios na gestão de resíduos eletrônicos. Os processos de reciclagem precisam, ainda, serem adaptados para lidar com novos compostos e estruturas (FORTUNE BUSINESS INSIGHT, 2025; SILVA, 2013).

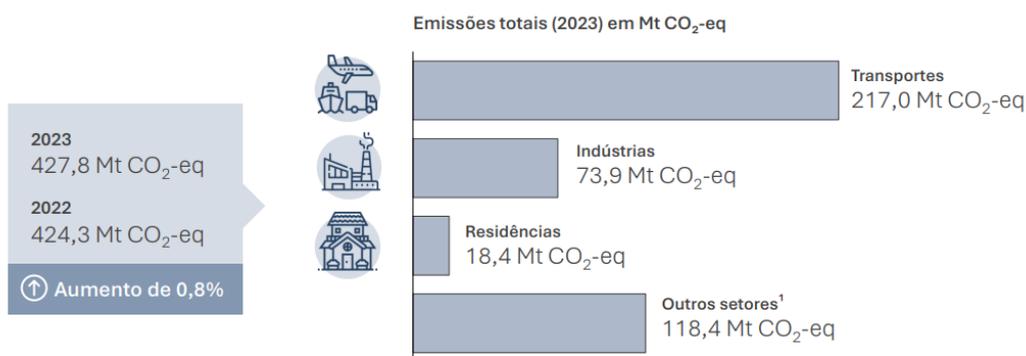
Um outro desafio é a compatibilidade com outras tecnologias de baterias que já estão presentes no mercado. Muitas das inovações envolvendo nanomateriais buscam melhorar baterias de íons de lítio, mas não há uma solução que seja totalmente compatível com as tecnologias de baterias existentes. Logo, essa integração com sistemas amplamente utilizados se torna fundamental para que os nanomateriais sejam adotados de forma eficaz, e isso envolve desafios de design e modificações das linhas de produção, o que pode elevar ainda mais os custos. A

introdução de novos nanomateriais, também, pode exigir mudanças no design da célula de baterias já difundidas, o que pode afetar o tamanho, a forma e até a segurança das baterias (THE ROYAL SOCIETY, 2024).

Algumas soluções para esses problemas são a otimização da produção com investimentos em processos mais baratos, como fabricação de grafeno por deposição química, que podem reduzir custos. Pesquisas de materiais alternativos com novos nanomateriais, como óxido de vanádio e sílica nanoestruturada, que conseguem ser mais baratos e sustentáveis. Uso de materiais híbridos, no qual alguns pesquisadores já estão explorando, como a combinação de nanomateriais com outros tipos de materiais, entre eles, polímeros ou metais, para melhorar a estabilidade e a condutividade sem comprometer a performance (SAXENA et al, 2023; VIAN et al, 2021). Uma regulação mais atualizada com foco em desenvolver políticas para a produção e reciclagem segura de nanomateriais em baterias. E por fim, a integração da matriz energética com energias renováveis, visto que um dos setores de maior poluição é o setor de transporte (Figura 18) o uso de nanomateriais pode tornar baterias mais eficientes para armazenamento de energia provenientes de fontes solar e eólica (DELGADO et al, 2022; MME, 2024).

Figura 18 - Emissões de CO₂ no setor de transporte no Brasil

Em 2023, o total de **emissões de CO₂** antrópicas associadas à **matriz energética** brasileira atingiu 427,8 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, um aumento de 0,8% em relação a 2022.



Fonte: Balanço Energético Nacional, 2024.

5 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA A NANOTECNOLOGIA E VEÍCULOS ELÉTRICOS

As perspectivas futuras para a nanotecnologia em veículos elétricos (VEs) são extremamente promissoras e podem transformar a indústria automotiva nos próximos anos. Com os avanços contínuos, espera-se que a nanotecnologia desempenhe um papel fundamental em diversos aspectos dos veículos elétricos, desde a eficiência das baterias até a construção do veículo em si (FECHINI, 2020).

As baterias de alta performance e longa duração são uma promessa no mercado, como as baterias de estado sólido, usando nanomateriais que prometem ser mais seguras e mais eficientes do que as baterias de íons de lítio tradicionais. Elas têm a vantagem de não conter líquidos inflamáveis, reduzindo o risco de incêndios, associado a uma maior densidade de energia, o que aumentaria o alcance dos VEs e reduziria o tempo de recarga. As melhorias na condutividade e na estabilidade dos materiais permitirão que se tornem comercialmente viáveis mais rapidamente (FECHINI, 2020; SAXENA et al, 2023).

Redução no peso e aumento de eficiência energética com o uso de nanomateriais permitirão a produção de componentes estruturais mais leves, como por exemplo, o uso de nanocompósito de fibra de carbono para o chassi dos veículos. Isso reduziria o peso geral do carro e, conseqüentemente, melhoraria a eficiência energética e autonomia dos veículos elétricos, pois um carro mais leve consome menos energia para se mover, aumentando o alcance da própria bateria (BAIG et al, 2021; FECHINI, 2020; NOTARIANNI et al, 2016).

Veículos elétricos com mais eficiência tem menos manutenção. Lubrificantes e revestimentos nanométricos podem reduzir o atrito e o desgaste de várias partes do veículo, como motores, sistemas de transmissão e freios, aumentando a eficiência e reduzindo a necessidade de manutenção. Além disso a nanotecnologia, também, pode ser aplicada na tecnologia de sensores para otimizar o desempenho do veículo, permitindo uma gestão inteligente de energia e monitoramento em tempo real de diversos sistemas (BAIG et al, 2021; FINDIK, 2021). Outra perspectiva é nos sensores e na conectividade avançada. Nanossensores serão fundamentais para o desenvolvimento de veículos autônomos e conectados, coletando dados em tempo real sobre o ambiente e sobre o próprio desempenho do carro. Esses sensores poderão ser embutidos em várias partes do veículo, melhorando a segurança, a

navegação e a eficiência do carro, além de otimizar o uso da energia da bateria com base nas condições de tráfego e estrada (LIMA, 2022; RIVERA et al, 2014).

Sustentabilidade e reciclagem de baterias é outro fator importante que deve ser levado em conta no aprimoramento de veículos elétricos, já que os métodos para extrair e reutilizar metais como lítio, cobalto e níquel ainda geram degradação do meio ambiente. Em processos hidrometalúrgicos, por exemplo, a nanotecnologia pode ajudar a minimizar o uso de produtos químicos e de energia durante a reciclagem de baterias, tornando o processo mais verde e econômico. O uso de nanomateriais pode facilitar a recuperação desses recursos de maneira mais eficiente, o que auxiliaria na redução da necessidade de mineração de novos materiais e a minimizar o impacto ambiental (UNICEP, 2024). Nanopartículas de adsorção, por exemplo, podem adsorver e capturar íons metálicos, como lítio e cobalto, durante o processo de reciclagem, aumentando a taxa de recuperação desses materiais valiosos de forma mais eficaz. Nanotubos de carbono e grafeno, conseguem melhorar a eficiência da extração de metais preciosos, podendo ser aplicados para capturar resíduos metálicos com maior precisão e menor consumo de energia, e conseqüente menor emissão de CO₂ (BRASIL, 2024; PASCHOALINO et al, 2010; SILVA, 2013).

O caminho para a economia circular tem o potencial de transformar a indústria de baterias de veículos elétricos, onde os materiais são reaproveitados de forma eficiente, reduzindo a extração de recursos naturais e a quantidade de resíduos gerados. Uma pesquisa realizada por cientistas noruegueses da Universidade de Ciência e Tecnologia da Noruega (NTNU), desenvolveram uma bateria sustentável que se autorrepara (WAGNER, 2025), ela consegue minimizar os desafios relacionados ao descarte inadequado e ao alto custo de reciclagem das baterias convencionais (Figura 19). Isso mostra que a combinação de nanotecnologia com novos modelos de negócios pode permitir que as baterias sejam recicladas de maneira mais eficiente, com os materiais extraídos sendo reutilizados na produção de novas baterias, mantendo o ciclo de vida dos recursos por mais tempo (ABSOLAR, 2023; SOUZA et al, 2024; UNICEP, 2024).

Figura 19 - Bateria de célula que se autorrepara.



Fonte: Wagner, 2025.

A construção de veículos mais inteligentes e sustentáveis é uma outra forma de tornar o uso de VEs mais limpos ao meio ambiente. Nesse caso a nanotecnologia pode auxiliar na criação de veículos inteligentes, onde a estrutura do carro e os componentes eletrônicos interagem para melhorar a experiência de condução e a eficiência energética. Exemplo disso, é a inclusão de painéis solares formados por nanomateriais nas superfícies dos carros para complementar a carga da bateria ou gerar energia adicional, através do uso de materiais fotovoltaicos nanoestruturados (JEEVANANDAM et al, 2018) que poderiam permitir que os carros absorvessem energia solar diretamente, aumentando a autonomia e reduzindo a dependência de fontes externas de recarga (ABSOLAR, 2023; SOUZA et al, 2024; UNICEP, 2024).

Por fim, a economia dos custos com produção e materiais, à medida que os nanomateriais se tornam mais comuns e a produção em larga escala se torna mais viável, é o indício de que o preço das baterias pode cair significativamente. Um exemplo disso, é que pesquisadores chineses desenvolveram uma bateria de estado sólido de lítio recarregável utilizando um novo tipo de material sulfeto chamado LPSO (LIQUAN, 2021). Este material é significativamente mais barato e fácil de produzir em larga escala em comparação com os eletrólitos sólidos tradicionais, reduzindo os custos de produção em até 90%. Além de tudo isso, a nanotecnologia também pode ajudar a reduzir os custos com manutenção dos veículos, uma vez que as partes do carro seriam mais duráveis e eficientes, resultando em menores custos operacionais ao longo da vida útil do veículo (LIQUAN, 2021; VENDITTI, 2021).

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVA

A nanotecnologia tem se mostrado uma abordagem revolucionária para o aprimoramento dos sistemas de armazenamento de energia, especialmente no contexto das baterias para veículos elétricos. Estudos demonstram que o uso de nanomateriais como grafeno, nanotubos de carbono e óxidos metálicos pode aumentar a densidade energética de baterias de íon-lítio em até 30%, além de melhorar a estabilidade em ciclos prolongados de carga e descarga (ZHANG et al, 2021). Em relação aos supercapacitores, dispositivos com eletrodos nanoestruturados já atingem densidades de energia superiores a 80 Wh/kg, aproximando-se do desempenho de baterias comerciais, com a vantagem de tempos de recarga mais curtos (JEEVANANDAM et al, 2018; REZENDE et al, 2022; SELLA et al, 2021).

Os óxidos de metais de transição, como MnO_2 , Fe_3O_4 e TiO_2 , têm sido amplamente investigados por sua elevada capacitância específica, condutividade ajustável e abundância na natureza, oferecendo alternativas economicamente viáveis e ambientalmente mais sustentáveis (BAIG et al, 2021; CABRAL et al, 2009; VICENTE, 2018). Além disso, estruturas baseadas em grafeno apresentam área superficial superior a 2600 m^2/g , conferindo alta capacidade de adsorção iônica e excelente condutividade elétrica (REAL et al, 2022). Com o avanço contínuo das pesquisas e o desenvolvimento de novas técnicas de síntese e manufatura, espera-se que as próximas gerações de baterias apresentem maior densidade energética, carregamento ultrarrápido e maior segurança. Além disso, a busca por alternativas além do lítio, como baterias de estado sólido e sistemas baseados em sódio ou magnésio, podem impulsionar ainda mais a sustentabilidade e a viabilidade econômica do setor. Assim, a nanotecnologia continuará desempenhando um papel essencial na transição para fontes de energia mais eficientes e limpas (BAIG et al, 2021; CHOI et al, 2024; FERRASSO et al, 2022; REAL et al, 2022).

Essas inovações contribuem para a redução do impacto ambiental, promovendo soluções mais ecológicas para a mobilidade elétrica. Com muitas dessas pesquisas já em estágios avançados, espera-se que, em um futuro próximo, a produção em larga escala desses materiais se torne viável, reduzindo custos e facilitando sua implementação no mercado (FGV, 2022; GABER et al, 2024; SOUZA et al, 2024), com foco na redução do uso de metais críticos e no desenvolvimento de nanocompósitos híbridos (SINGH et al., 2023). Essa direção está fortemente alinhada

aos objetivos globais de transição energética e desenvolvimento sustentável (ONU, 2015).

No entanto, ainda há desafios a serem superados, como os altos custos de produção, a escalabilidade dos processos de fabricação e a necessidade de soluções eficientes para reciclagem e descarte desses materiais (LEICHSENRING, 2023; OLIVEIRA, 2020). Conclui-se, portanto, que a nanotecnologia aplicada ao desenvolvimento de materiais para armazenamento de energia constitui uma área de intensa evolução científica e tecnológica. Sua contribuição é decisiva para o aprimoramento do desempenho de baterias, bem como para a construção de sistemas energéticos mais eficientes, seguros e ambientalmente responsáveis. Fortalecendo a mobilidade elétrica e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (GINLEY et al, 2011; MARTÍNEZ, 2024; OLIVEIRA, 2020; SOUZA et al, 2024).

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Állan Willian Pimentel de. *et al.* Estudo teórico e prático de hidrogênio PEM FC. **Revista Esfera Acadêmica tecnologia**, Vitória, 2016. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/10/revista-esfera-tecnologia-v01-n02-artigo-04.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

AMBROSIO, Renato Canha; TICIANELLI, Edson Antonio. Baterias de níquel-hidreto metálico, uma alternativa para as baterias de níquel-cádmio. **SciELO Brasil**, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/NcSrLNz7h6fbmySd3Lfchzz/#:~:text=As%20baterias%20de%20n%C3%ADquel%20hidreto%20met%C3%A1lico%20est%C3%A3o%20tornando%20se%20competitivas,de%20alta%20densidade%20de%20energia>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ANTAGONISTA. Baterias de carros elétricos: Conheça os modelos e cuidados necessários. **O Antagonista**, São Paulo, 2025. Disponível em: <https://oantagonista.com.br/carros/baterias-de-carros-eletricos-conheca-os-modelos-e-cuidados-necessarios/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

APPLE. Por que íon de lítio? **Apple Brasil**, São Paulo, s.d. Disponível em: <https://www.apple.com/br/batteries/why-lithium-ion/>. Acesso em: 25 jan. 2025.

ARANDA. Eletrodo de nanotubo de carbono promete revolucionar baterias. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/em/noticia/1084-Eletrodo-de-nanotubo-de-carbono-promete-revolucionar-baterias.html>. Acesso em: 5 mar. 2025.

BAIG, Nadeem; KAMMAKAKAM, Irshad; FALATH, Wail. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. **Materials Advances**, Dhahran, 2021. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ma/d0ma00807a>. Acesso em: 20 out. 2024.

BENTO, Raphael. Entendendo o Funcionamento da bateria de lítio. **BB Baterias**, 2022. Disponível em: [https://blog.bbbaterias.com.br/bateria-de-litio/#:~:text=Bateria%20de%20l%C3%ADtio%20ferrofosfato%20\(LiFePO4,e%20maior%20seguran%C3%A7a%20no%20modelo](https://blog.bbbaterias.com.br/bateria-de-litio/#:~:text=Bateria%20de%20l%C3%ADtio%20ferrofosfato%20(LiFePO4,e%20maior%20seguran%C3%A7a%20no%20modelo). Acesso em: 10 mar. 2025.

BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e Baterias: Funcionamento e impacto ambiental. **Química Nova na Escola**, 2000. Disponível em: https://qnint.s bq.org.br/qni/popup_visualizarConceito.php?idConceito=45&se. Acesso em: 21 out. 2024.

BRANÍCIO, Paulo S. Introdução à supercondutividade, suas aplicações e a mini revolução provocada pela redescoberta do MGB2: uma abordagem didática. **SciELO Brasil**, São Carlos, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/8CSJ5zLMH4ZJdndBGBKJdwg/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 2.327, de 2021**. Determina que a logística reversa de baterias de veículos elétricos deverá priorizar a reciclagem e reaproveitamento de seus componentes na fabricação de novas baterias. 2021. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/148903#:~:text=Projeto%20de%20Lei%20n%C2%B0%202327%2C%20de%202021,seus%20componentes%20na%20fabrica%C3%A7%C3%A3o%20de%20novas%20baterias>. Acesso em: 10 mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional**: relatório síntese 2024. Brasília: MME, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 401, de 4 de novembro de 2008**. Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências. 2008. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=570. Acesso em: 21 mar. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 11 mar. 2025.

BUCHMANN, Isidor. **Batteries in a portable world**: a handbook on rechargeable batteries for non-engineers. 2. ed. Richmond, BC: Cadex Electronics Inc, 2001.

BYD. BYD Yuan Plus. **BYD Brasil**, Campinas, 2025. Disponível em: <https://www.byd.com/br/car/yuan-plus>. Acesso em: 20 março 2025.

CABRAL, Emanuelli L. *et al.* Preparação de nanofibras poliméricas por *electrospinning*. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 10., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Porto Alegre: PUCRS. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/617.pdf>. Acesso em: 11 janeiro 2025.

CADENASER. Arranca el plan de Mercedes de jubilar las baterías actuales y crear la sucesora con autonomía de 1.000 kilómetros. **Cadenaser**, 2025. Disponível em: <https://cadenaser.com/nacional/hype/2025/03/03/arranca-el-plan-de-mercedes-de-jubilar-las-baterias-actuales-y-crear-la-sucesora-con-autonomia-de-1000-kilometros-cadena-ser/>. Acesso em: 20 março 2025.

CAMPOS, Maxdavid Oliveira. **Estudo comparativo de pás para aerogeradores de grande porte fabricados em materiais compósitos reforçada com fibras de carbono ou fibras de vidro**. 2013. 113 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12818/1/EstudoComparativoP%C3%A1s_Campos_2013.pdf. Acesso em: 10 março 2025.

CANCINO, Juliana; MARANGONI, Valéria S; ZUCOLOTTI, Valtencir. Nanotecnologia em medicina: aspectos fundamentais e principais preocupações. **SciELO Brasil**, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/dcxWV4RTSSjxDK3SsbdR8rR/>. Acesso em: 10 janeiro 2025.

CANTANE, Daniel Augusto; ANDO JUNIOR, Oswaldo Hideo; HAMERSCHMIDT, Márcio Biehl. **Tecnologias de armazenamento de energia aplicadas ao setor elétrico brasileiro**. São Carlos: Scienza, 2020. Disponível em: https://editorascienza.com.br/pdfs/pti/livro_tecnologias.pdf. Acesso em: 28 nov. 2025.

CASARIN, Ricardo. O impacto do carro elétrico ao meio ambiente. **Portal Solar**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/mobilidade-eletrica/o-impacto-do-carro-eletrico-ao-meio-ambiente?utm>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CENTRO UNIVERSITÁRIO CENTRAL PAULISTA. **Nanotecnologia e suas Aplicações: o que esperar para o futuro?** São Carlos: UNICEP, 2024. Disponível em: <https://www.unicep.edu.br/post/nanotecnologia-e-suas-aplica%C3%A7%C3%B5es-o-que-esperar-para-o-futuro#:~:text=Eles%20oferecem%20uma%20maior%20%C3%A1rea,e%20utilizamos%20energia%20no%20futuro>. Acesso em: 20 mar. 2025.

CHOI, Jong Hui. et al. Low-crystallinity conductive multivalence iron sulfide embedded S-doped anode and high-surface area O-doped cathode of 3D porous N-rich graphitic carbon frameworks for high-performance sodium-ion hybrid energy storages. **ScienceDirect**, Yuseong District, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829724001958?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jan. 2025.

DELGADO, Fernanda. *et al.* A transição energética no setor de transportes para nações em desenvolvimento: A Perspectiva Brasileira. **Cadernos FGV energia**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_de_transicao_energetica_no_setor_de_transportes_rev4.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

EDELSTEIN, Stephen. Célula de bateria experimental baseada em nanofios recarrega 100,000 vezes ou mais. Célula de bateria experimental baseada em nanofios recarrega 100,000 vezes ou mais. **Autos EU**, 2016. Disponível em: <https://autoseu.com/pt/experimental-nanowire-based-battery-cell-recharges-100000-times-or-moreexperimental-nanowire-based-battery-cell-recharges-100000-times-or-more>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ENERGIA Solar com capacitores – Como funciona? São Paulo, **Portal solar**, s.d. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-com-capacitores-como-funciona>. Acesso em: 8 nov. 2024.

ETT, Gerhard. et al. Sistemas eletroquímicos para armazenamento de energia. **Tratamento de Superfície 219**, 2020. Disponível em: https://www.portals.com.br/wp-content/uploads/2020/04/28_31-materia-tecnica-FEI-1.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

FECHINI, Pierre Basílio Almeida. **Avanços no desenvolvimento de nanomateriais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/55633>. Acesso em: 28 set. 2024.

FERASSO, Clauber Andre; SILVA, Willian Delfim da; SCHAEFFER, Lirio. Revisão: Novas tecnologias em materiais e processos de produção para baterias níquel-ferro. **Brazilian Journal of Technology**, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJT/article/download/54903/40522/134693>. Acesso em: 27 dez. 2024.

FERNANDES, Maria F. M.; FILGUEIRAS, Carlos A. L. Um panorama da nanotecnologia no Brasil (e seus macro-desafios). **SciELO Brasil**, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/7CTjGcTGJww4rrbHND3LzBg/#>. Acesso em: 27 dez. 2025.

FERRARI, Victoria c. et al. Controlling the Activation Energy for Single-Ion Diffusion through a Hybrid Polyelectrolyte Matrix by Manipulating the Central Coordinate Semimetal Atom. **The Journal of Physical Chemistry Letters**, Santo André, 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jpcllett.9b02928?JournalCode=jpclcd&quickLinkVolume=10&quickLinkPage=7684&selectedTab=citation&volume=10>. Acesso em: 23 out. 2024.

FERREIRA, Helder Rodrigues. Tecnologias de armazenamento térmico para usinas heliotérmica. *In*: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 8., 2020, Fortaleza. **Abstracts** [...]. Natal, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/download/806/806#:~:text=UTILIZAC%C3%87%C3%83O%20DO%20ARMAZENAMENTO%20T%C3%89RMICO%20NO,de%20calor%20utilizado%20na%20usina>. Acesso em: 10 fev. 2025.

FIGUEIREDO, Patrick Benedito Silva de. **Síntese de nanofios de MnCo e aplicação em supercapacitores**. 2021. 71 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Química/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021. Disponível em: <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/3456>. Acesso em: 8 fev. 2025.

FINDIK, Fehim. Nanomaterials and their applications. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)**, Sakarya, 2021. Disponível em: https://www.academia.edu/87007926/Nanomaterials_and_their_applications. Acesso em: 11 dez. 2024.

FIORAVANTE, Frederico Ramos. **Estudo de nanofios metálicos por primeiros princípios**. 2009. 141 p. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/IACO-84WTHX>. Acesso em: 18 janeiro 2025.

FIORAVANTI, Carlos. A energia do germânio: novo material poderia aumentar a durabilidade e a segurança das baterias de lítio. **Revista Pesquisa FAPESP 288**, Santo André, 2020. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2020/02/060_litio_288NOVO.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

FORTUNE BUSSINESS INSIGHTS. Lithium Ion Battery Recycling Market Size, Share & Industry Analysis, By Chemistry (Lithium Cobalt Oxide, Lithium Iron Phosphate, Lithium Manganese Oxide, Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide, and Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide). **Fortune Business Insights**. Maharashtra, 2025. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/lithium-ion-battery-recycling-market-100244>. Acesso em: 20 mar. 2025.

GABER, Safa. et al. MOFite: A High-Density Lithiophilic and Scalable Metal–Organic Framework Anode for Rechargeable Lithium-Ion Battery. **Angewandte Chemie International**, EditionVolume 63, Issue 44, Madrid, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.202409256>. Acesso em: 1 nov. 2024.

GARCIA, Eloísa E. C. Nanocompósitos: Novas opções em materiais de embalagem. **Instituto de tecnologia de alimentos**, 2003. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v15n1/v15n1_artigo1.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

GINLEY, David S; CAHEN, David. **Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

GROSS, Eytan. Insights into Future Mobility. **MIT Energy Initiative**. Cambridge, 2019. Disponível em: <http://energy.mit.edu/insightsintofuturemobility>. Acesso em: 10 jan. 2025.

IBERDROLA. Aplicações da nanotecnologia: Nanotecnologia: uma pequena solução para grandes problemas. Bilbao. **Iberdrola**, s.d. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/aplicacoes-da-nanotecnologia>. Acesso em: 20 fev. 2025.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Nanofios de silício aumentam capacidade de baterias de lítio em 10 vezes. **Inovação tecnológica**, 2007. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=capacidade-de-baterias-de-litio-aumentam-10-vezes&id=010115071227&>. Acesso em: 10 dez. 2022.

JACINTO JUNIOR, Silvio Gentil. et al. Células a combustível: possibilidades e limitações. **Research, Society and Development**, Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/28522/24689/328010>. Acesso em: 8 dezembro 2024.

JANNUZZI, Gilberto de Martino. **Programa brasileiro de células a combustível**. Brasília: CGEE, 2002. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Programa+Bras+Cel.+Combustivel_1167.pdf/8d33d701-6b70-40c8-a184-1ae5c55a9e30?version=1.0#:~:text=As%20c%C3%A9lulas%20a%20combust%C3%ADvel%20podem,quest%C3%A3o%20da%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia. Acesso em: 11 dez. 2024.

JEEVANANDAM, Jaison. et al. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, Frankfurt, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5905289/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

LEICHSENDRING, Stefan. Do petróleo ao carro elétrico: Toyota e Idemitsu fazem parceria para bateria sólida. **Inside Evs**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/691378/toyota-parceria-petrolifera-bateria-solida/>. Acesso em: 17 jan. 2025.

LEICHSENDRING, Stefan. Mercedes-Benz testa carro com bateria sólida e 1.000 km de autonomia. **Inside Evs**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/751604/mercedes-eqs-bateria-solida-teste/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

LIMA, Francisco Eduardo Holanda. **Nanopartículas de prata como plataforma de sensoriamento na detecção de arsênio inorgânico por espectrofotometria UV-Vis em amostras de arroz e camarão**. 2022. 63 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/73307>. Acesso em: 13 mar. 2025.

LIQUAN, Chen. Academician of Chinese Academy of Engineering: Solid-state batterie. **Welion tech**, Beijing, 2021. Disponível em: https://www.solidstatelion.com/en/news_page/338.html. Acesso em: 21 dez. 2024.

LISBOA, Kleber Marques. **Análise do transporte de massa em baterias de fluxo redox de pequena escala**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/13530>. Acesso em: 17 nov. 2024.

MACIEIRA, Keila. **Novos revestimentos para reatores a água pressurizada – um estudo neutrônico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/34285/2/Novos%20revestimentos%20para%20reatores%20%C3%A0%20%C3%A1gua%20pressurizada%20-%20um%20estudo%20neutr%C3%B4nico.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2025.

MARTÍNEZ, Javier Ruiz. Crean un material que dobla el rendimiento de las baterías de litio, clave para los coches eléctricos. **Cadenaser**, 2024. Disponível em: <https://cadenaser.com/nacional/2024/10/16/crean-un-material-que-dobla-el-rendimiento-de-las-baterias-de-litio-clave-para-los-coches-electricos-cadena-ser/?utm>. Acesso em: 16 jan. 2025.

MATSUBARA, Elaine Y; NERY, Cláudio R; ROSOLEN, J. Maurício. Pilhas alcalinas: um dispositivo útil para o ensino de Química. **SciELO Brasil**, Ribeirão Preto, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/kCPY5xh8dLGw8xvKcDhLD6S/>. Acesso em: 25 set. 2024.

MELO JUNIOR, Maurício Alves. et al. Preparação de nanopartículas de prata e ouro: um método simples para a introdução da nanociência em laboratório de ensino. **SciELO Brasil**, Campinas, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/wfcttywf33BdvbMBYmCxPg/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

MENDONÇA, Alisson Henrique Duarte França de. **Sistemas de armazenamento de energia**. Recife, Universidade de Pernambuco, 2022. Disponível em: <https://www.confex.org.br/midias/uploads-imce/Contecc2021/Eletricista/SISTEMAS>

%20DE%20ARMAZENAMENTO%20DE%20ENERGIA.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

MEU RESÍDUO. Nissan transforma baterias usadas de carros em baterias portáteis. **Meu resíduo**, 2024. Disponível em: <https://www.meuresiduo.com/news/nissan-transforma-baterias-usadas-de-carros-em-baterias-portateis/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

MOSTAGI, Yuri Mendes, *et al.* **Célula de combustível**. Faculdade Pitágoras, 2011. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/65197/1/C%C3%A9lula%20de%20combust%C3%ADvel.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2025.

NEVES, Raphael Paranhos. **Estudo do efeito de aditivos em eletrólitos no desempenho de baterias de fluxo e células a combustível de vanádio**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2022. Disponível em: https://web.archive.org/web/20220524023355id_/http://sofia.fei.edu.br:8080/pergamumweb/vinculos/0000aa/0000aa72.pdf. Acesso em: 18 dez. 2025.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <https://bib.pucminas.br/teses/EngMecanicaNoceT1.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2024.

NOTARIANNI, Marco. *et al.* Synthesis and applications of carbon nanomaterials for energy generation and storage. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, Frankfurt, 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4734431/>. Acesso em: 19 out. 2024.

NOVOSELOV, K. S. *et al.* A roadmap for graphene. **Nature** **490**, London, 2012. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11458>. Acesso em: 16 fev. 2025.

NUNES, Anderson. Daimler Truck e Linde estabelecem novo padrão para tecnologia de reabastecimento de hidrogênio líquido. **Mercedes Mag**, 2024. Disponível em: <https://www.mercedesmagazine.com.br/blog/daimler-truck-e-linde-estabelecem-novo-padrao-para-tecnologia-de-reabastecimento-de-hidrogenio-liquido/>. Acesso em: 5 abr. 2025.

O IMPACTO do carro elétrico ao meio ambiente. **ABSOLAR**, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/o-impacto-do-carro-eletrico-ao-meio-ambiente/#:~:text=A%20an%C3%A1lise%20mostra%20que%20os,de%20BEVs%20podem%20cair%2086%25>. Acesso em: 20 mar. 2025.

O QUE leva Apple, Google, Tesla e outras empresas a serem acusadas de lucrar com trabalho infantil na África. **BBC News Brasil**, 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-50828077>. Acesso em: 20 jan. 2025.

OLIVEIRA, Hugo Alvarenga. Desenvolvimento de nanomateriais para aprimoramento de rede elétrica inteligente. **Caderno Opinião**. FGV Energia, 2020.

Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opinioao_dezembro_-_nanomateriais_-_hugo_oliveira2.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Como as Nações Unidas apoiam os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil**. Brasília: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 2 abril 2025.

OS CARROS elétricos são mais sustentáveis? **Blog Realixo**, 2024. Disponível em: <https://realixo.com.br/blog/2024/11/27/os-carros-eletricos-sao-mais-sustentaveis/?utm>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PASCHOALINO, Matheus P; MARCONE, Glauciene P. S; JARDIM, Wilson F. Os nanomateriais e a questão ambiental. **SciELO Brasil**, Campinas, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/J4kFgpGnQKH7yJ4w65JPhRq/?lang=pt>. Acesso em: 12 mar. 2025.

PEIXOTO, Raul Batista. **Física do processo de deposição de filmes finos por Spin Coating**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/61016/7/2021_tcc_raupeixoto.pdf. Acesso em: 28 dez. 2024.

REAL, Carla G. et al. Freestanding niobium pentoxide-decorated multiwalled carbon nanotube electrode: Charge storage mechanism in sodium-ion pseudocapacitor and battery. **Sciencedirect**, Campinas, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22008027>. Acesso em: 28 dez. 2024.

REDA, Walid. Um guia completo para preservar a bateria do iPhone - e reduzir o envelhecimento. **iPhone Islam**, 2020. Disponível em: <https://iphoneislam.com/pt/2020/03/Guia-completo-para-economizar-bateria/81045>. Acesso em: 25 jan. 2025.

REUTERS. Nuevo diseño de batería para autos eléctricos no dañaría demanda por metales, dicen mineras. **Reuters**, 2021. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/business/nuevo-diseo-de-batera-para-autos-elctricos-no-daara-demanda-por-metales-d-idUSL1N2PD1WH/>. Acesso em: 5 fev. 2025.

REZENDE, Izabella Helena Werneck Soares; BORGES, Luiz Eduardo Pizarro; PEREIRA, Robson Pacheco. Supercapacitores: Revisão. **Research, Society and Development**, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: [https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/37069/30943/408450#:~:text=N%20entanto%2C%20o%20voltamograma%20correspondente,al.%2C%20\(2020\)](https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/37069/30943/408450#:~:text=N%20entanto%2C%20o%20voltamograma%20correspondente,al.%2C%20(2020).). Acesso em: 23 out. 2024.

RÍOS, Juan. Crean en Harvard una batería para autos eléctricos que se carga en 10 minutos. **Infobae**, 2024. Disponível em: <https://www.infobae.com/tecno/2024/01/17/crean-en-harvard-una-bateria-para-autos-electricos-que-se-carga-en-10-minutos./>. Acesso em: 5 fev. 2025.

RIVERA, Ricardo; TEIXEIRA, Ingrid. Perspectivas para a eletrônica orgânica no Brasil. **BNDES**. Biblioteca digital, 2014. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4804/1/BS%2040%20Perspectivas%20para%20a%20eletr%C3%B4nica%20org%C3%A2nica%20no%20Brasil_P.pdf. Acesso em: 17 fev. 2025.

RODRIGUES, Robson Pereira; SOUZA, José Eduardo Silva; TAMBOR, José Humberto Machado. As células de combustível de hidrogênio: suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente. *In: Seminário Internacional Étnico Racial*, 7., 2018, Guarulhos. **Anais** [...]. Centro Universitário ENIAC, 2019. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/607. Acesso em: 26 nov. 2024.

RODRIGUEZ, Jassiel R. et al. Ge₂Sb₂Se₅ Glass as High-Capacity Promising Lithium-ion Battery Anode. **Sciencedirect**, West Lafayette, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/am/pii/S221128551931033X>. Acesso em: 15 fev. 2025.

ROSSO, Henrique. **Pesquisa da UFPR estuda nanorevestimentos inteligentes contra corrosão**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020. Disponível em: <https://ufpr.br/pesquisa-da-ufpr-estuda-nanorevestimentos-inteligentes-contracorrosao/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SAKATA, Solange Kazumi. **Nanotecnologia para produção e armazenamento de energia**. São Paulo: Conselho Regional de Química IV Região, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=b2F-pmK8xXc&list=RDb2F-pmK8xXc&t=2014>. Acesso em: 10 set. 2024.

SANFELICE, Rafaela Cristina; PAVINATTO, Adriana; CORRÊA, Daniel Souza. **Nanotecnologia aplicada a polímeros**. São Paulo: Blucher, 2022. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/article-details/01-23574/>. Acesso em: 18 out. 2024.

SAXENA, Amit; BHATTACHARYA, Bhaskar; CABALLERO-BRIONES, Felipe. **Applications of nanomaterials for energy storage devices**. Boca Raton: CRC Press, 2023.

SELLA, Giovani Pereira. et al. Supercapacitores como meio de armazenamento de energia para circuitos autônomos seguidores de linha. *In: Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware)*, 18., 2021, Online. **Anais** [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/19922>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SILVA, Louise Horquen da. Revisão bibliográfica sobre relações entre nanomateriais, toxicidade e avaliação de riscos: a emergência da nanotoxicologia. **Disciplinarum Scientia | Saúde**, Santa Maria, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumS/article/view/1061>. Acesso em: 16 fev. 2025.

SILVA, Melissa Florence Marques Miécimo da. **Síntese de nanopartículas de silício e aplicações atuais**. Rio de Janeiro: Oswaldo Cruz Foundation, 2024.

Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/384695045_SINTESE_DE_NANOPARTICULAS_DE_SILICIO_E_APLICACOES_ATUAIS. Acesso em: 5 dez. 2024.

SILVEIRA, José Luiz; LEAL, Elisângela Martins. **Análise de sistemas de cogeração utilizando células de combustível**: estudo de casos. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá, [2000?]. Disponível em: <https://abcm.org.br/anais/encit/2000/arquivos/s04/S04P04.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2025.

SINDISTAL. Vale inaugura sistema de armazenamento de energia por baterias. **Sindistal**, 2024. Disponível em: <https://sindistal.org.br/vale-inaugura-sistema-de-armazenamento-de-energia-por-baterias/>. Acesso em: 16 jan. 2025.

SINGH, R. et al. Green nanomaterials for sustainable energy storage systems. **Journal of Cleaner Production**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137477>. Acesso em: 15 mar. 2025.

SOUSA JUNIOR, Elizaldo Severino de. **Sistemas de armazenamento de energia por baterias**: histórico, aplicações e desafios. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/63011/63011.PDF>. Acesso em: 25 set. 2025.

SOUZA, Rodrigo F.B. et al. Innovative lead-carbon battery utilizing electrode-electrolyte assembly inspired by PEM-FC architecture. **Sciencedirect**, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X2401003X?via%3Dihub>. Acesso em: 15 mar. 2025.

STÊNIO, Kleydson; VINICIUS, Marcos. **Nanotecnologia aplicada à energia**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2011. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/58479195/Nanotecnologia-aplicada-a-Energia>. Acesso em: 17 set. 2024.

THE ROYAL SOCIETY. **Nanoscience and nanotechnologies**: opportunities and uncertainties. Londres, 2004. Disponível em: <https://royalsociety.org/-/media/policy/publications/2004/9693.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2025.

União Europeia. Parlamento Europeu. **Regulamento UE 2023/1542**. Regras de sustentabilidade para as baterias e respetivos resíduos. União Europeia, 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:4704179>. Acesso em: 25 mar. 2025.

UNITED STATES. Energy Information Administraton. **Hydrogen explained** - Use of hydrogen. EIA, 2024. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of-hydrogen.php>. Acesso em: 15 jan. 2025.

UTSUMI, Shigenori. et al. Giant nanomechanical energy storage capacity in twisted single-walled carbon nanotube ropes. **Nature Nanotechnology volume 19**, Chino, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41565-024-01645-x>. Acesso em: 28 out. 2024.

VENDITTI, Mário Sérgio. Reciclagem é o futuro das baterias elétricas: indústria tem se preparado para reaproveitar todos os materiais do equipamento no fim de sua vida útil. **Estadão**, 2021. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/reciclagem-e-o-futuro-das-baterias-eletricas/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

VENTURA, Thiago. Mercedes testa bateria de estado sólido com mais de 1.000 km de autonomia. **CNN Brasil**, 2025. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/auto/mercedes-testa-bateria-de-estado-solido-com-mais-de-1-000-km-de-autonomia/#goog_rewarded. Acesso em: 20 mar. 2025.

VIAN, Ângelo. Et al. **Armazenamento de energia: fundamentos, tecnologia e aplicações**. Blucher Open Access, 2021. Disponível em: https://www.blucher.com.br/armazenamento-de-energia-fundamentos-tecnologia-e-aplicacoes_9786555500578. Acesso em: 28 out. 2024.

VIANA JUNIOR, Emilson Ribeiro. **Propriedades elétricas e fotoelétricas de nanofitas de SnO₂**. 2014. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9HTFFG/1/tese.doutorado_f_sica_ufmg_emilson.r.viana_fev_2014_final.pdf. Acesso em: 15 fev. 2025.

VICENTE, Dr. André de Albuquerque. Bateria de íões de lítio. Uma breve revisão. **CBMM**, 2018. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/eventos/2018/iii-litio-brasil/apresentacoes/baterias-litio-programa-cbmm-andre-vicente.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2025.

WAGNER, Nils Peter. Self-repairing and environmentally friendly EV battery. **Norwegian SciTech**, Oslo, 2025. Disponível em: <https://norwegianscitechnews.com/2025/03/researchers-in-this-lab-are-creating-a-self-repairing-and-environmentally-friendly-ev-battery/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

WAKAMATSU, Mitzi Hass. SALOMÃO, Rafael. Nanopartículas cerâmicas: propriedades, aplicações e implicações. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 54., 2010, Foz do Iguaçu. **Abstracts** [...]. Santo André: Programa de Pós-Graduação em Nanociências e Materiais Avançados, 2010. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/efb5ac59-5613-4444-b163-a9ff516a5488/prod_023105_sysno_3011385.pdf. Acesso em: 19 jan. 2025.

WENDT, Hartmut; GÖTZ, Michael; LINARDI, Marcelo. Tecnologias de células a combustível. **SciELO Brasil**, Darmstadt, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/NYnZ6bbM7TY6RKRGGTJTmqr/?format=pdf#:~:text=C%C3%A9lulas%20de%20baixa%20temperatura%20de%20opera%C3%A7%C3%A3o%2C%20que%20utilizam%20uma%20membrana,das%20vantagens%20inerentes%20como%20alta>. Acesso em: 13 jan. 2025.

WENDT, Hartmut; LINARDI, Marcelo; ARICÓ, Eliana M. Células a combustível de baixa potência para aplicações estacionárias. **SciELO Brasil**, Dieburg; São Paulo, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/vC8Y8sTNKS476gW5nVnnQDw/?format=pdf&lang=pt#:~>

:text=C%C3%A9lulas%20a%20%C3%A1cido%20fosf%C3%B3rico%20PAFC%20da%20IFC%20PC25&text=A%20firma%20japonesa%20Fuji%20Electric,%C3%A0s%20instala%C3%A7%C3%B5es%20da%20empresa%20IFC. Acesso em: 18 jan. 2025.

YE, Luhan. et al. Fast cycling of lithium metal in solid-state batteries by constriction-susceptible anode materials. **Nature Materials**, Cambridge, 2022. Disponível em: https://scholar.harvard.edu/sites/scholar.harvard.edu/files/lixin/files/ye_et_al-2024-nature_materials-1.pdf. Acesso em: 17 mar. 2025.

ZAPAROLLI, Domingos. Pesquisadores brasileiros desenvolvem bateria à base de sódio. **Um só Planeta Globo**, 2023. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2023/07/13/pesquisadores-desenvolvem-bateria-a-base-de-sodio.ghtml>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ZHANG, Bowen. et al. Atomic mechanism of lithium dendrite penetration in solid electrolytes. **Nature Communications**, Pequim, 2025. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11850858/>. Acesso em: 19 mar. 2025.