

Revisão: Novas tecnologias em materiais e processos de produção para baterias níquel-ferro

Review: New technologies in production processes materials and for nickel-iron batteries

DOI:10.38152/bjtv5n4-001

Recebimento dos originais: 28/10/2022

Aceitação para publicação: 01/12/2022

Clauber Andre Ferasso

Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais no Programa de Pós-Graduação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS- PPGE3M)

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre - Rio Grande do Sul

E-mail: clauber.andre@gmail.com

Willian Delfim da Silva

Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais no Programa de Pós-Graduação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS- PPGE3M)

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre - Rio Grande do Sul

E-mail: willian.delfim@ufrgs.br

Lirio Schaeffer

Doutor em Engenharia

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM)

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre - Rio Grande do Sul

E-mail: schaefer@ufrgs.br

RESUMO

A crescente demanda energética mundial e os impactos ambientais acarretados pelo uso de combustíveis fósseis, além da estimativa que aponta para o esgotamento das reservas destes recursos ainda neste século, impulsionam cada vez mais a diversificação da matriz energética. A priorização ao uso de fontes de energia limpa, por exemplo, a partir de recursos renováveis, vem sendo pauta em pesquisas e bibliografias no Brasil e no mundo, e tem enfoque tanto na geração quando no armazenamento de energia. Dispositivos que convertem e armazenam energia, como capacitores e baterias, são fundamentais para a disponibilidade da eletricidade para pronto consumo. Capacidade de armazenamento, tempo de carregamento, segurança operacional, vida útil e custo, são alguns dos aspectos relacionados a tais equipamentos com alta relevância para as presentes e futuras aplicações da transformação tecnológica que já vivenciamos no âmbito da energia. A partir de avanços trazidos pelas novas tecnologias, estudos posteriores têm possibilitado a implementação de melhorias também em baterias já conhecidas. Caso como o das baterias Fe- Ni, que apesar de serem produzidas desde o fim do século XIX, caíram em desuso com o surgimento de materiais mais modernos, e nos últimos anos tiveram um renovado interesse como tópico em pesquisas para melhoria dos parâmetros técnicos e aumento de capacidade e eficiência

energética. Este trabalho tem como intuito apresentar os recentes avanços aplicados nos métodos de fabricação, e na composição dos materiais e aditivos para os eletrodos e eletrólitos nas baterias Fe-Ni.

Palavras-chave: baterias ferro-níquel, armazenamento de energia, eletrólito, eletrodos.

ABSTRACT

The growing worldwide energy demand and the environmental impacts caused by the use of fossil fuels, in addition to the estimate that points to the exhaustion of the reserves of these resources still in this century, increasingly drives the diversification of the energy matrix. The prioritization of the use of clean energy sources, for example, from renewable resources, has been the focus of research and bibliography in Brazil and worldwide, and is focused both on the generation and storage of energy. Devices that convert and store energy, such as capacitors and batteries, are fundamental to the availability of electricity for ready consumption. Storage capacity, charging time, operational safety, useful life, and cost are some of the aspects related to such equipment with high relevance for the present and future applications of the technological transformation we are already experiencing in the energy field. From advances brought by new technologies, further studies have enabled the implementation of improvements also in batteries already known. This is the case of Fe-Ni batteries, which despite being produced since the end of the 19th century, fell into disuse with the emergence of more modern materials, and in recent years have had a renewed interest as a topic in research for the improvement of technical parameters and increase in capacity and energy efficiency. This paper aims to present the recent advances applied in manufacturing methods, and in the composition of materials and additives for the electrodes and electrolytes in Fe-Ni batteries.

Keywords: iron-nickel batteries, energy storage, electrolyte, electrodes.

1 INTRODUÇÃO

Hoje, a produção de energia, o armazenamento de energia e o aquecimento global são tópicos comuns de discussão na sociedade sobre meio ambiente e economia, com importante enfoque em muitas áreas da pesquisa. Fatores como mudanças climáticas, segurança energética, redução de custos e redução de emissões, estão impulsionando o desenvolvimento atual da geração de energia renovável. O desenvolvimento econômico global é, em grande medida, dependente do acesso a grandes quantidades de fontes de energia baratas, pois a forma como as tecnologias energéticas sustentáveis são necessárias para que o desenvolvimento seja sustentável. À medida que tais avanços continuam a se desenvolver, o consumo de energia também aumenta, com estimativa de que a demanda por energia elétrica dobre até a metade do século XXI [1].

Com base em estudos recentes, como visto na Figura 1, a demanda global por baterias está projetada para aumentar em 25% ao ano, podendo alcançar cerca de 2.600 GWh em 2030 [2].

Figura 1: Perspectiva de crescimento global da indústria de baterias até 2030 [3].



No entanto, o sistema de armazenamento de energia por bateria, com as condições certas, pode permitir uma mudança significativa de energia e transporte no que tange as emissões livres de gases de efeito estufa ou sua diminuição, para dessa forma, auxiliar na promoção da transformação da energia renovável em uma base confiável, ao invés de uma fonte alternativa [3] [4].

2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS

Os sistemas de armazenamento por baterias fornecem reservas operacionais para o sistema de energia e ajudam na regulação de frequência e tensão. As baterias podem mudar o consumo de energia para tempos de produção de baixo custo ou emissões mais baixas para os usuários, que por sua vez gerenciam a produção de energia para tempos de preço mais altos [5][6].

Compara-se graficamente na Figura 2 as tecnologias tradicionais de baterias recarregáveis com base na densidade de energia, ciclo de vida, potência, custo da bateria e nível de segurança.

Figura 2: Comparação qualitativa entre algumas tecnologias de baterias [7] [8].



As baterias recarregáveis oferecem a perspectiva de armazenar energia elétrica como energia química usando materiais de diferentes estados de valência que podem ser usados reversivelmente por meio de reações de oxirredução. A combinação de baterias recarregáveis e

tecnologia de geração de energia renovável é um passo importante para um futuro verde, que inclui vantagens proeminentes como a redução das emissões de carbono [9].

Em comparação com os requisitos de eletricidade para eletrônicos portáteis e veículos elétricos, as baterias utilizadas no armazenamento de eletricidade de maior escala englobam muitas tecnologias promissoras, sobretudo as baterias recarregáveis com eletrólito

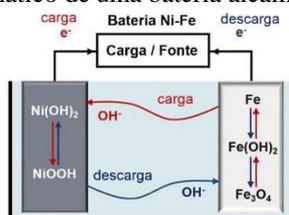
aqueoso, dos tipos alcalinos ou ácidos. No geral, essas baterias têm alto potencial devido à sua excelente densidade de potência, segurança e relativa facilidade de fabricação [8].

3 BATERIAS NÍQUEL-FERRO

As baterias níquel-ferro (Ni-Fe) foram desenvolvidas entre os séculos XIX e XX, por Thomas Edison, nos Estados Unidos, e Waldemar Jungner, na Suécia. Dotadas de grande longevidade operacional, esses acumuladores foram historicamente utilizados em condições físicas severas, tanto para iluminação e tração de veículos em minas, quanto para propulsão em submarinos e equipamentos militares. Além disso, permaneceram industrialmente relevantes até a década de 1970, pois o desenvolvimento consolidado em outras baterias, como os avanços das baterias chumbo-ácido e o advento das baterias de lítio-íon, com maior energia específica e densidade de energia, substituíram-nas na maioria de suas aplicações anteriores [10].

A composição básica da bateria Ni-Fe, conforme apresentado na Figura 3, consiste em dois eletrodos, um cátodo de hidróxido de níquel (NiOH) e um ânodo de óxido de ferro (FeOH), imersos em uma solução alcalina, geralmente contendo hidróxido de potássio.

Figura 3: Diagrama esquemático de uma bateria alcalina de níquel-ferro típica [10]



Elas foram criadas como uma alternativa técnica e economicamente mais atraente às baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) e as baterias corrosivas de chumbo-ácido (Pb-ácido). Hoje, algumas poucas empresas ao redor do mundo produzem baterias Ni-Fe, que são usadas principalmente para armazenar eletricidade excedente de painéis solares e turbinas eólicas. Recentemente, novas pesquisas voltaram a retomar atenção às baterias Ni-Fe devido ao seu baixocusto e as considerações ambientais atrativas.

4 MATERIAIS COMERCIAIS PARA OS ELETRODOS

O processo convencional de fabricação de eletrodos de níquel na indústria é realizado com a deposição de uma mistura contendo hidróxido de níquel propriamente com substâncias aglutinantes e água sob um substrato poroso, a base de níquel metálico, e seca ao ar em temperatura ambiente. Outra via de obtenção dos eletrodos bem estabelecida ao

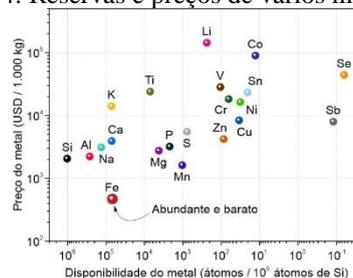
longo da históriaé através da sinterização dos materiais ativos, levado a uma seguinte etapa em que se realiza a impregnação do cátodo.

A morfologia tem grande influência no desempenho dos eletrodos de níquel, sendo um aspecto representativo nos índices de densidade de energia obtidos pelas baterias Ni-Fe. A partir do final da década de 1980, a produção do hidróxido de níquel esférico passou a atrair muita atençãodevido à sua maior densidade de energia e melhor condutividade elétrica, propícia a uma distribuição de corrente mais uniforme, aumentando a capacidade do número de ciclos de carga- descarga [11].

Na comparação com outras baterias à base de níquel, aquelas que também empregam cátodos com este material metálico, a bateria Ni-Fe possui uma capacidade específica teórica mais elevada, de 224 mAh/g, frente às baterias Ni-Cd com 181 mAh/g, Ni-MH com 178 mAh/g e Ni-Zn com 215 mAh/g [10].

Em conjunto com o eletrodo níquel, a utilização do ferro como material ativo base para ânodos em configurações de baterias tem valia pelo seu baixo custo e grande disponibilidade, conforme mostrado na Figura 4, em relação a outros elementos metálicos.

Figura 4: Reservas e preços de vários metais [10]



O ferro é o segundo metal mais abundante na crosta terrestre e o quarto mais abundante dentre todos os elementos químicos, não tóxico, e historicamente, um dos metais mais utilizados pelo ser humano. Como ânodo, o eletrodo negativo das baterias, em meio a soluções alcalinas este metal apresenta um potencial de redução de -0,88 V, em relação ao SHE (*standard hydrogen electrode*, ou eletrodo padrão de hidrogênio), estável e capaz de apresentar valores de capacidade específica e volumétrica, respectivamente, de 960 mAh/g e 7.557 mAh/cm³.

Em comparação com outros componentes construtivos das baterias Ni-Fe, os eletrodos à base de ferro apresentam um efeito significativo no desempenho eletroquímico geral desses dispositivos de armazenamento de energia. Assim, alterando a composição, o design, a nanoestrutura e até mesmo as técnicas de produção do ânodo, pode-se implicar em potenciais melhorias no desempenho geral da bateria Ni-Fe [11].

5 NOVOS MATERIAIS ATIVOS APLICADOS EM BATERIAS NÍQUEL-FERRO

Para avançar ainda mais no desenvolvimento de baterias recarregáveis de alta densidade de energia, novos materiais com novos princípios de trabalho são urgentemente necessários. Ao mesmo tempo, uma compreensão básica da evolução do eletrodo nos níveis eletroquímico e molecular dos materiais e da bateria durante a operação também é necessária para aplicações práticas.

Dentre as técnicas empregadas para melhoria de desempenho das baterias Ni-Fe que mais se destacam, até o momento, estão as promissoras investigações estabelecidas em questão da nanotecnologia, aplicando a nanoestruturas à arquitetura das células eletroquímicas, da manipulação de composição química dos materiais dos eletrodos e da solução do eletrólito, além da engenharia de interfaces [10].

Na Tabela 1 são mostradas algumas das mais atuais configurações em baterias Ni-Fe em relação ao uso de materiais avançados de alto desempenho, relacionando algumas de suas propriedades operacionais.

Tabela 1: Desempenho eletroquímico de baterias alcalinas de níquel-ferro [10].

Ânodo	Cátodo	Eletrólito	Tensão (V)	Capacidade de descarga (mAh/g)	Densidade de corrente (mA/g)	
Fe / C (<i>core-shell</i>) Na ₂ S	+Ni(OH) ₂ comercial	8 M KOH + 1 M LiOH	1,1	600	200	
Cu / Fe (<i>core-shell</i>) Na ₂ S	+Ni(OH) ₂ comercial	8 M KOH + 1 M LiOH	1,1	800	200	
Fe-Ni / Fe ₃ O ₄ (<i>core-shell</i>)	CNi(OH) ₂ comercial	6 M KOH + 0,35 M LiOH + 0,05 M Na ₂ S	1,1	338	400	
Fe / C (<i>core-shell</i>)	Ni(OH) ₂ / grafeno dopado com nitrogênio	1 M KOH	1,1	100	2.000	
Fe / nanotubos de carbono múltipla + 3% Bi ₂ S ₃	de NiO / nanotubos de carbono múltipla	de parede de carbono múltipla + LiOH	7 M KOH + 1 M LiOH	1,13	600	100

Os materiais nanoestruturados mostram que certas morfologias são eficazes no aumento da área de superfície disponível e na redução do comprimento de difusão para transporte de elétrons e íons.

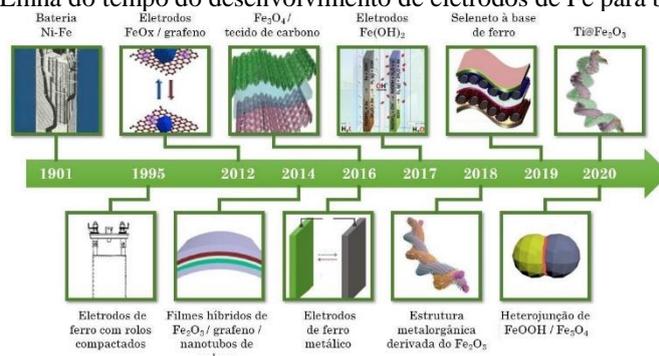
O uso desses novos materiais ativos em baterias Ni-Fe oferece vários benefícios. Por exemplo, esses materiais geralmente são capazes de melhorar o desempenho de baterias Ni-Fe em altas temperaturas, o que é significativo pois as altas temperaturas costumam ser um problema para esses dispositivos. Além disso, os novos materiais ativos muitas vezes são capazes de reduzir a quantidade de danos que as baterias Ni-Fe sofrem durante eventos de descarga de alta intensidade [10].

5.1 RECENTES DESENVOLVIMENTOS PARA ELETRODOS DE FERRO

A fim de contornar os problemas trazidos pelo fenômeno de evolução de hidrogênio e melhorar a capacidade específica, vários aditivos de enxofre e bismuto têm sido usados como aditivos de eletrodo ou eletrólito em baterias Ni-Fe. Dentre aqueles que se mostram mais eficazes estão os compostos de sulfeto de bismuto (Bi_2S_3), óxido de bismuto (Bi_2O_3), sulfeto de ferro (FeS), sulfeto de potássio (K_2S), sulfeto de sódio (Na_2S), e compostos organossulfurados [6].

Esforços têm sido dedicados a melhorar o desempenho eletroquímico de ânodos de ferro através da hibridização de nanomateriais à base de ferro e carbono, como nanocompósitos metálicos à base de ferro e nanotubos de carbono e grafeno. Isso não apenas aumenta a condutividade elétrica e diminui a distância de transporte de elétrons, mas também aumenta a área de superfície ativa e melhora a utilização de materiais ativos. Na Figura 5 é representada a linha do tempo com alguns dos desenvolvimentos em eletrodos de ferro para aplicação em baterias.

Figura 5: Linha do tempo do desenvolvimento de eletrodos de Fe para baterias [14]



Todavia, na maioria dos casos, a preparação envolve procedimentos sintéticos complexos. O acoplamento físico fraco entre o carbono e os materiais ativos pode limitar as reações para uma transferência de carga eficiente. Além do mais, devido à alta hidrofobicidade dos nanocarbons, é difícil obter uma distribuição uniforme de carbono em compósitos por mistura física [15].

A aplicação otimizada de materiais ativos em eletrodos de ferro é respaldada pelo uso de nanomateriais de Fe ou Fe_3O_4 , em que pesa o aumento da área superficial específica das partículas, a redução da distância de transferência iônica e acelera a taxa de reação. Um outro método utilizado para aumento do sobrepotencial de evolução de hidrogênio de eletrodos de ferro, e mitigar a quantidade de evolução de hidrogênio durante o carregamento, compete à opção por composições com carbono ou enxofre [16].

Baterias Ni-Fe ultrarrápidas foram desenvolvidas em uma concepção de

nanopartículas de óxido de ferro e folhas de óxido de grafeno reduzido como ânodo. Tal aprimoramento permitiu alcançar taxas de carga-descarga quase 1.000 vezes maiores que as baterias Ni-Fe convencionais [17]. Nessa mesma direção, o revestimento dos eletrodos por material condutor, como carbono ou polímeros condutores, também é uma solução para melhoria de sua estabilidade estrutural [13].

Exemplo prático é a sintetização de hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) na superfície de fibras de nanotubos de carbono altamente condutivos e, posterior revestimento com polipirrol condutor para aumentar a difusão de elétrons, íons e estabilidade cíclica. No entanto, mesmo com os promissores avanços em pesquisas e novos passos no aprimoramento da tecnologia aplicada aos eletrodos para baterias Ni-Fe, com estabilidade superior e alta densidade de energia, a difícil escalabilidade dos processos dessa fabricação para atender um volume de mercado com custos competitivos, ainda é um importante gargalo [18] [19].

5.2 RECENTES DESENVOLVIMENTOS PARA ELETRODOS DE NÍQUEL

A partir dos anos 2000, o aumento dos veículos elétricos em níveis globais impulsionou o surgimento de novas oportunidades para cátodos à base de níquel, sobretudo associados em baterias lítio-íon, em que a demanda por baterias de baixo custo e alta energia pôde ser atendida por materiais catódicos contendo níquel [13].

Estratégias em engenharia de materiais que vão desde a escala atômica, com dopagem catódica, até escala nanométrica, de estabilização de superfície, e escala micrométrica, por manipulação da morfologia de partículas secundárias, estão sendo intensamente investigadas para resolver os problemas encontrados em eletrodos de níquel [20][21].

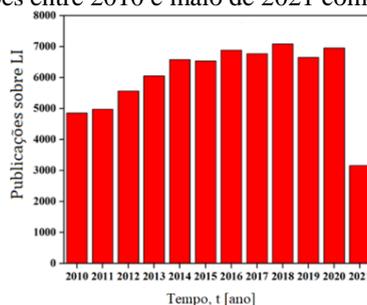
A adição de *carbon black* melhora o uso de níquel como material ativo em eletrodos, mas leva a uma diminuição na estabilidade eletroquímica. Modificações estruturais com a substituição parcial do composto $\text{Cu}(\text{OH})_2$ por $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$ pode melhorar significativamente a eficiência coulombiana do material ativo $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$, enquanto melhora a capacidade de descarga específica e a estabilidade do eletrodo [22].

Muitos estudos mostram que a adição de elementos bivalentes, como magnésio, cobalto e zinco, pode melhorar a utilização e a vida útil dos materiais catódicos em baterias Ni-Fe. Em teoria, no entanto, a forma $\alpha\text{-Ni}(\text{OH})_2$ está associada à expansão do volume que provoca o inchaço da bateria durante os processos de carga-descarga [23].

5.3 EVOLUÇÃO DO ELETRÓLITO COMPOSTO DA BATERIA NÍQUEL FERRO

Na última década, mais de 70.000 artigos foram publicados, conforme mostrado na Figura 6, com o tema eletrólito e líquidos iônicos. Líquidos iônicos à temperatura ambiente têm atraído a atenção como composto em eletrólitos de baterias, proporcionando uma alta densidade de energia, visto que não são voláteis e não inflamáveis e possuem estabilidade eletroquímicas. Devido ao fator físico-químico favorável e propriedades eletroquímicas do imidazólio, piperidínio, e líquidos iônicos à base de pirrolidínio [24] [25].

Figura 6: Publicações entre 2010 e maio de 2021 com referência a Li [26]

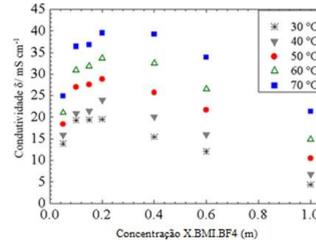


Os líquidos iônicos com base nos grupos de cadeias laterais de alcoxialquil ou substituintes fluoroalquil tipicamente têm menos viscosidade em comparação com líquidos iônicos dialquil substituídos, enquanto a massa molecular dos líquidos iônicos correspondentes é minimamente alterada devido a esses substituintes. Além disso, o elétron retirando alcoxialquil e fluoroalquil,

devido ao seu efeito de redução de energia, seria esperado para mostrar aumento moderado nos potenciais de oxidação, devido ao eletrólito e líquido iônico, que complementaríamos os cátodos CFx com ótimas faixas de tensão [27].

Na Figura 7, é apresentada a dependência da condutividade iônica (σ) dos eletrólitos BMI.BF₄ em diferentes frações molares de BMI.BF₄ (X BMI.BF₄), no intervalo de 30 a 70 °C. A condutividade do líquido iônico mostra a forte atração eletrostática entre os cátions BMI⁺ e os ânions BF₄⁻, o que, combinado com a alta viscosidade, dificulta a auto-dissociação. Portanto, dependendo do uso, é conveniente adicionar um solvente com alta permissividade, para promover maior dissociação e reduzir a viscosidade da solução, facilitando o transporte de carga em resposta a um campo elétrico [26].

Figura 7: Condutividade iônica do BMI.BF4 a 30-70°C [26]



De modo geral, as baterias Ni-Fe utilizam o hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito numa solução aquosa a 30%. Alguns pontos precisam ser melhorados como a perda de eficiência em baixas temperaturas. A energia fornecida pela bateria é proporcional à temperatura, o que significa que aumentando a temperatura melhora seu desempenho. A uma temperatura de 4°C, a capacidade de operação da bateria Ni-Fe cai para zero [28].

Como o eletrólito permanece essencialmente inalterado durante carga e descarga, não é possível usar a gravidade específica do eletrólito para determinar o estado de carga, ao contrário outros tipos de baterias [28]. Desta forma, as pesquisas e análises de materiais e tecnologias favorecem um melhor desempenho, atuando principalmente na eficiência da bateria, principalmente em baixas temperaturas, onde não há condutividade e o modo de operação é praticamente nulo.

6 FUTURO NOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE BATERIAS

Claramente, novas descobertas em desempenho operacional de baterias apontam o caminho para o mercado, mas a importância da tecnologia e eficiência voltadas ao processo de fabricação não pode ser negligenciada, para melhorias nos produtos, produtividade, segurança e confiabilidade [29].

Em virtude da nova legislação ambiental que regulamenta o descarte de baterias em vários países, é necessário promover a sua reciclagem. Laboratórios e empresas de todo mundo, promovem pesquisas para desenvolver novos processos de reciclagem de baterias usadas ou, em determinados casos, desenvolvem novos métodos de tratamentos para permitir um descarte final seguro [30].

7 CONCLUSÃO

Com base nos resultados, é notável a busca por novas tecnologias de dispositivos armazenadores de energia e, também, melhoras nas tecnologias existentes, como é o caso da bateria níquel ferro. Numa visão geral, tanto os eletrodos, quando o eletrólito, atualmente estão sendo desenvolvidos ou estudados para isso, como uma estruturação composta que potencializa seu modo de operação, proporcionando um melhor desempenho na

operabilidade com melhor eficiência na carga e descarga, aumentando a faixa de trabalho em diferentes temperaturas, especialmente nas mais baixas.

REFERÊNCIAS

- [1] BRODNY, J.; TUTAK, M.; BINDZÁR, P. Assessing the level of renewable energy development in the European Union member states: a 10-year perspective. **Energies**, Basileia, v. 14, n. 13, p. 3765, 2021.
- [2] HANNAN, M. A. *et al.* Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. **Journal of Energy Storage**, Amsterdã, v. 42, p. 103040, 2021.
- [3] GLOBAL BATTERY ALLIANCE. **A vision for a sustainable battery value chain in 2030: unlocking the full potential to power sustainable development and climate change mitigation**. Genebra: Global Battery Alliance, 2019.
- [4] OLABI, A. G. *et al.* Critical review of energy storage systems. **Energy**, Kidlington, v. 214, p. 118987, 2021.
- [5] ZHANG, T. *et al.* Mesoporous Fe₃O₄@C nanoarrays as high-performance anode for rechargeable Ni/Fe battery. **Science China Materials**, Weinheim, v. 64, n. 5, p. 1105–1113, 2021.
- [6] TAWONEZVI, T. Development of a composite iron-matrix electrode for nickel-iron battery energy storage systems. 2019. 157 f. Cape Peninsula University of Technology, Cidade do Cabo, 2019.
- [7] TARASCON, J.-M.; ARMAND, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. **Materials for Sustainable Energy**, Berlim, p. 171–179, 2010.
- [8] MUÑOZ-TORRERO, D. *et al.* A critical perspective on rechargeable Al-ion battery technology. **Dalton Transactions**, Cambridge, v. 48, n. 27, p. 9906–9911, 2019.
- [9] VISWANATHAN, B. Batteries. In: VISWANATHAN, B. (org.). **Energy sources**. 1 ed. Amsterdã: Elsevier, 2017. p.263–313.
- [10] HE, Z. *et al.* Iron metal anode for aqueous rechargeable batteries. **Materials Today Advances**, Amsterdã, v. 11, p. 100156, 2021.
- [11] MANOHAR, A. K. *et al.* A high-performance rechargeable iron electrode for large-scale battery-based energy storage. **Journal of The Electrochemical Society**, Pennington, v. 159, n. 8, p. A1209–A1214, 2012.
- [12] HUANG, L. *et al.* Copper/iron composite anode prepared by in situ co-precipitation with excellent high-rate and low-temperature performance for rechargeable nickel-iron battery. **International Journal of Electrochemical Science**, Belgrado, v. 13, n. 7, p. 7045–7056, 2018.
- [13] WANG, L. *et al.* A critical review on nickel-based cathodes in rechargeable batteries. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, Pequim, v. 29, n. 5, p. 925–941, 2022.
- [14] YANG, J. *et al.* High-capacity iron-based anodes for aqueous secondary nickel-iron batteries: recent progress and prospects. **ChemElectroChem**, Weinheim, v. 8, n. 2, p. 274–

290, 2021.

[15] ZENG, Y. *et al.* High-capacity and high-rate Ni-Fe batteries based on mesostructured quaternary carbon/Fe/FeO/Fe₃O₄ hybrid material. **iScience**, Cambridge, v. 24, n. 6, p. 102547, 2021.

[16] SHANGGUAN, E. *et al.* Sublimed sulfur powders as novel effective anode additives to enhance the high-rate capabilities of iron anodes for advanced iron-based secondary batteries. **Electrochimica Acta**, Kidlington, v. 301, p. 162–173, 2019.

[17] WANG, H. *et al.* An ultrafast nickel-iron battery from strongly coupled inorganic nanoparticle/nanocarbon hybrid materials. **Nature Communications**, Berlin, v. 3, n. 917, p. 1–8, 2012.

[18] LIU, K. *et al.* A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. **Frontiers of Mechanical Engineering**, Pequim, v. 14, n. 1, p. 47–64, 2019.

[19] LIU, C. *et al.* Superstructured α -Fe₂O₃ nanorods as novel binder-free anodes for high-performing fiber-shaped Ni/Fe battery. **Science Bulletin**, Amsterdã, v. 65, n. 10, p. 812–819, 2020.

[20] LIU, B. *et al.* 120 years of nickel-based cathodes for alkaline batteries. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausana, v. 834, p. 155185, 2020.

[21] LI, W.; ERICKSON, E. M.; MANTHIRAM, A. High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries. **Nature Energy**, Berlin, v. 5, n. 1, p. 26–34, 2020.

[22] ZIDE, D. *et al.* The influence of copper and carbon black on electrochemical behavior of nickel positive electrode. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, Lausana, v. 878, p. 114539, 2020.

[23] LIU, L. *et al.* Co doped α -Ni(OH)₂ multiple-dimensional structure electrode material. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 295, p. 340–346, 2019.

[24] CHATURVEDI, P.; SIL, A.; SHARMA, Y. Energy storage performance of hybrid aqueous supercapacitor based on nano-Li₂MnSiO₄ and activated carbon. **Ionics**, Heidelberg, v. 22, n. 9, p. 1719–1728, 2016.

[25] ZHU, N. *et al.* Ionic liquid-based electrolytes for aluminum / magnesium / sodium-ion batteries. **Energy Material Advances**, Washington, D.C., v. 2021, p. 1–29, 2021.

[26] KARIMI, N. *et al.* Nonfluorinated ionic liquid electrolytes for lithium metal batteries: ionic conduction, electrochemistry, and interphase formation. **Advanced Energy Materials**, Weinheim, v. 11, n. 4, p. 2003521, 2021.

[27] ZHANG, H. *et al.* Fluorine-free noble salt anion for high-performance all-solid-state lithium–sulfur batteries. **Advanced Energy Materials**, Weinheim, v. 9, n. 25, p. 1900763, 2019.

[28] SHUKLA, A. K.; VENUGOPALAN, S.; HARIPRAKASH, B. Nickel-based rechargeable batteries. **Journal of Power Sources**, Amsterdã, v. 100, n. 1–2, p. 125–148,

2001.

[29] FREITAS, S. M. C.; CARVALHO, A. R.; **Inteligência artificial na análise de vida útil de baterias.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.3, p.24215-24233, mar 2021.

[30] GOMES, C. R. W.; MILKE, C. E.; **Processos de reciclagem de pilhas e baterias: uma revisão dos principais métodos b** , Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.8, n.3, p.17469-17484, mar 2022.