

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SOROCABA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Kelly Schipitoski

**ESTUDO COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA PRODUZIDA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS**

Sorocaba

2022

KELLY SCHIPITOSKI

**ESTUDO COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA PRODUZIDA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia da UNESP Sorocaba como requerimento para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador Prof. Dr. Antonio Cesar Germano Martins

Sorocaba
2022

S336e Schipitoski, Kelly
Estudo comparativo de tecnologias de armazenamento de energia
produzida a partir de fontes renováveis / Kelly Schipitoski. --
Sorocaba, 2022
39 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de
Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Antonio Cesar Germano Martins

1. Energia Armazenamento. 2. Energias Fontes alternativas. 3.
Baterias solares. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

ESTUDO COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA PRODUZIDA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS

KELLY SCHIPITOSKI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Prof. Dr. Maurício Becerra Vargas
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio Cesar Germano Martins

Prof. Dr. Paulo Sergio Tonello

Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes

Julho de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo suporte e incentivo essenciais na busca por uma educação de excelência, aos meus amigos que compartilharam todos os momentos durante a graduação - cito aqui Lígia Soster Ramos, quem me apoiou e incentivou desde o início, ao Programa de Ensino Tutorial PET-ECA pelos aprendizados colhidos durante a minha participação e aos professores que despertaram meu interesse nas áreas renováveis.

SCHIPITOSKI, K. **Estudo Comparativo De Tecnologias De Armazenamento De Energia Produzida A Partir De Fontes Renováveis**. 2022 (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, UNESP – Universidade Estadual Paulista, 2022.

RESUMO

O trabalho a ser descrito consiste num estudo comparativo acerca das tecnologias - já desenvolvidas e em desenvolvimento – de armazenamento da energia em excesso, produzida a partir de fontes renováveis. Foi obtido um comparativo das baterias mais utilizadas e suas características, como densidade de energia e ciclo de vida. Além disso, foi exibido as principais aplicações destas tecnologias e, em paralelo, um estudo das baterias em desenvolvimento, que podem ganhar espaço no quesito de armazenamento do excedente de energia proveniente de sistemas renováveis.

Palavras-chave: Estudo comparativo; Armazenamento de energia; Baterias.

SCHIPITOSKI, K. **Comparative Study of Energy Storage Technologies Produced from Renewable Sources**. 2022 (Bachelor's degree Automation and Control Engineering) – Sorocaba Institute of Science and Technology, UNESP – São Paulo State University, Sorocaba, 2022.

ABSTRACT

The project to be described consists in a comparative study about technologies – already developed and under development – of surplus energy storage, produced by renewable sources. A comparison of the most used batteries and its characteristics was obtained such as energy density and life cycle. In addition, the main applications of these technologies were shown and, in parallel, a study of batteries under development, which may gain space in terms of storing surplus energy from renewable systems.

Keywords: Comparative study; Energy storage; Batteries.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética mundial.....	9
Figura 2 – Matriz energética nacional.	9
Figura 3 - Gasodutos Nord Stream e Nord Stream 2.....	12
Figura 4 - Comparativo de um sistema off grid e on grid.....	16
Figura 5 -funcionamento básico de uma bateria.	17
Figura 6 – Interior de uma bateria de chumbo-ácido, de forma simplificada.....	19
Figura 7 - Processo de carga e descarga de uma bateria de íon-lítio.....	20
Figura 8 - Componentes de uma bateria de fluxo redox. Imagem adaptada.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de vantagens e desvantagens.....	32
Tabela 2 – Principais aplicações das baterias.	33
Tabela 3 - Análise dos impactos ambientais das baterias.....	33
Tabela 4: Comparativo das características das baterias abordadas.	34

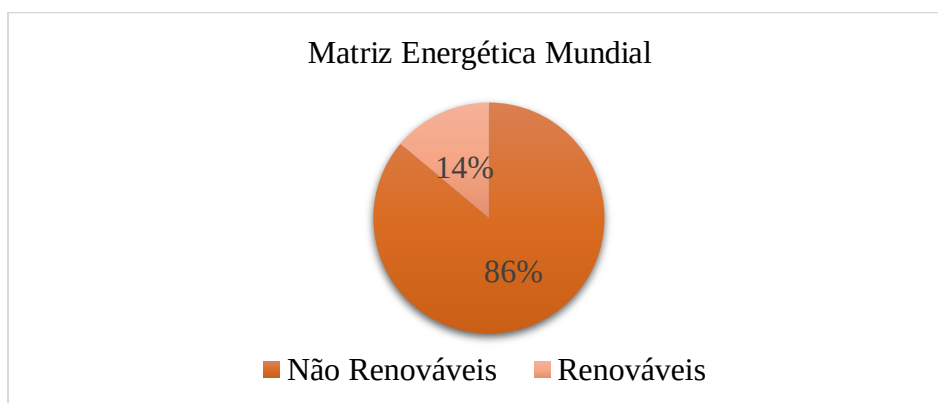
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
1.1.FORMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	15
1.1.1. Bateria de chumbo-ácido	18
1.1.2. Bateria de íon-lítio.....	19
1.1.3. Bateria de fluxo redox.....	21
2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	24
2.1.OBJETIVOS GERAIS	24
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3. METODOLOGIA	25
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
5. ANÁLISE E DISCUSSÕES	28
5.1.ANÁLISE COMPARATIVA	30
6. CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é predominantemente composta por fontes não renováveis, como o gás natural, carvão e petróleo que juntos representam aproximadamente 86% da matriz energética mundial (EPE, 2021), como se observa na Figura 1. Estes são as maiores responsáveis pelas mudanças climáticas.

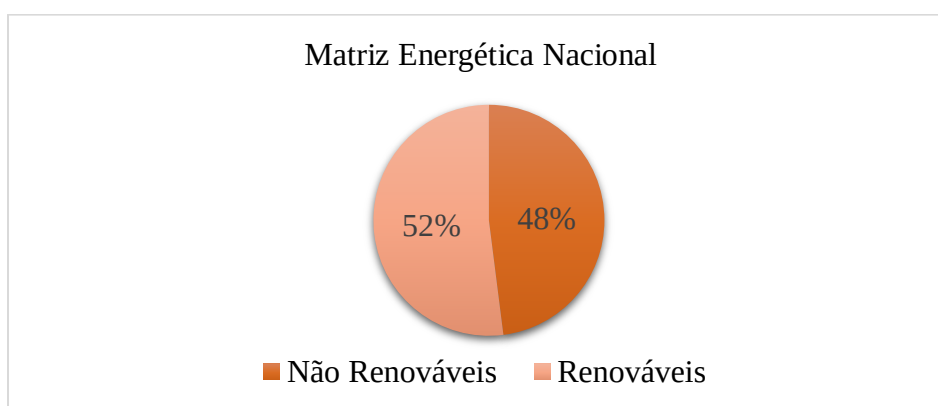
Figura 1 – Matriz energética mundial.



*Fonte - Adaptado de: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
Acesso em: 20/07/2022.*

De maneira oposta, o Brasil é referência no quesito utilização de fontes de energias renováveis, sendo cerca de 48,3% da matriz energética nacional, enquanto a média mundial está em torno de 18% (EPE, 2021), como se observa na Figura 2.

Figura 2 – Matriz energética nacional.



*Fonte - Adaptado de: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
Acesso em: 20/07/2022.*

Com isso, o Brasil é considerado um dos países que mais utiliza fontes de energia limpa, embora o consumo de energia proveniente de fontes não renováveis seja maior que o de renováveis.

A ampliação da utilização de fontes renováveis é vista como uma alternativa ao modelo energético atual, sendo uma forma de amenizar a degradação ambiental. Além disso, se tornam mais atrativas por serem recursos energéticos inesgotáveis, isto é, se regeneram em um curto espaço de tempo. As principais vantagens e desvantagens do uso dessas fontes são citadas abaixo.

Vantagens:

- Por ser renovável, entende-se que as fontes sempre estarão disponíveis, isto é, não são esgotáveis;
- Menores danos ambientais que as fontes não renováveis;
- Diminuem a dependência de combustíveis fósseis como a principal fonte energética;

Desvantagens:

- Mesmo que consideradas limpas, algumas dessas fontes renováveis causam danos ao meio ambiente, como os aerogeradores que influenciam o fluxo migratório de aves da região em que estão instalados;
- As tecnologias utilizadas para transformação das fontes renováveis em energia elétrica contêm componentes que possuem como matéria prima recursos naturais que necessitam de extração, que por sua vez, geram gases e impactos ambientais;
- Os resíduos sólidos provenientes dos equipamentos nem sempre são reciclados ou destinados à reciclagem quando chegam ao fim de seu ciclo de vida.
- Intermitência, realçando a necessidade de busca por tecnologias para armazenamento do excedente de energia produzida de forma a suprir a demanda energética quando a fonte renovável não consegue produzir.

As mudanças climáticas causadas pelo crescimento nas concentrações de gases como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) provocam o aumento do efeito estufa, além de chuva ácida, derramamento de óleo, perda de biodiversidade e poluição urbana. Os impactos citados são provocados por ações dos seres humanos e pelo sistema energético mundial. Não obstante, a prática do desmatamento, em especial no Brasil - predominantemente por conta da atividade pecuária - intensifica os impactos ambientais e agrava o aquecimento global.

Ainda assim, as soluções sustentáveis a partir de fontes renováveis surgem como uma tentativa de amenizar os impactos ambientais causados pelo uso desenfreado de fontes não renováveis, sendo estas extremamente necessárias e urgentes. Percebe-se, dessa forma, que as energias renováveis são o elemento-chave da transição energética, sendo a energia solar e a eólica as principais protagonistas.

Com o cenário da pandemia do COVID-19, é essencial analisar também como a pandemia impactou a demanda global de energia e o aumento expressivo de emissões de gás carbônico (segundo maior aumento anual da história). A Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*, em inglês) divulga anualmente um estudo do espectro geral dos problemas energéticos e as fontes utilizadas e em expansão, bem como eficiência energética, acesso à energia, entre outros. No ano de 2021, o relatório abordou a pandemia do COVID-19 e os impactos de demanda de energia e emissão de dióxido de carbono durante esse período, além de analisar como a economia como um todo foi afetada por conta dos fatores citados.

Em decorrência do conflito geopolítico que ocorre na Ucrânia, os países da Europa sofrem um impasse: não atuar diretamente contra a Rússia, responsável pelos incessantes ataques ao país ucraniano. Isso se dá pela Rússia ser o maior fornecedor de gás natural e petróleo do continente. O país russo detém a maior reserva de gás natural do mundo, fornecendo dessa forma, mais de 40% de toda a demanda europeia do produto. Adicionado a isso, a Rússia se encontra em sexto lugar em reservas de petróleo, além de ser um dos líderes em reservas de ouro, platina, níquel, minério de ferro e entre outros minérios (ESTEVEZ, 2022).

O fornecimento do produto se dá através de gasodutos, de tempos da era soviética, que passam pela Bielorrússia e Ucrânia, sendo complementados pelo Nord Stream e Turkish Stream. Adicionalmente, um novo gasoduto, intitulado por Nord Stream 2, possui uma extensão de 1,2 mil km e vai do oeste da Rússia ao nordeste da Alemanha, sob o mar Báltico, como se observa na Figura 3. Com o intuito de dobrar a quantidade de gás fornecida pelo país, o projeto de R\$ 60 bilhões que já está completamente construído se encontra sob ameaças em decorrência do conflito em andamento. Caso o projeto seja rejeitado, o continente europeu, que já está enfrentando consequências econômicas significativas em decorrência do aumento de preços de energia, irá ter custos ainda maiores. Por outro lado, a Ucrânia deseja que o gasoduto em questão seja rejeitado, já que o país lucra com as tarifas de “trânsito” do gás que passa pelo território por meio de outros dutos e a aprovação do projeto acarretaria numa perda de 1,8 bilhão de euros (BBC, 2022).

Figura 3 - Gasodutos Nord Stream e Nord Stream 2.



Fonte - BBC. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-60317372>
Acesso em: 05/03/2022.

Num possível cenário de interrupção de fornecimento de gás à Europa, a região ainda conseguiria sobreviver ao próximo inverno, mesmo que não seja uma situação fácil ou barata. A substituição do produto poderá ocorrer sem grandes consequências econômicas devastadoras ou que o fornecimento de eletricidade seja interrompido. Isso se dá pelas importações de gás natural liquefeito (GNL) feitas nos últimos meses, principalmente dos Estados Unidos. Entretanto, a demanda pelo gás deverá diminuir entre 10% a 15% da demanda anual. A Alemanha, em particular, se encontra numa situação difícil, já que a Rússia é responsável pelo fornecimento de cerca de metade de seu gás natural (CNN, 2022).

A União Europeia (UE) urgentemente necessita buscar formas de aumentar sua dependência energética à medida que o conflito geopolítico avança. A dependência de importações de energia no continente aumentou nos últimos anos, isso se deu por conta de uma menor produção de energia não renovável (carvão, gás, nuclear e petróleo), aliado a grande demanda de energia estável. Dados mostram que, em 2020, a UE importou 57,5% de sua energia e destes importados e no ano seguinte, importou 155 bilhões de metros cúbicos de gás natural proveniente da Rússia. Sendo uma fonte ainda necessária para o período de transição, o

gás natural é mais limpo que o carvão e possui a habilidade de fornecer um *buffer* flexível em casos de energia intermitente (falta de sol ou vento).

Torna-se, dessa forma, bastante importante a busca e o desenvolvimento de energias renováveis, como a solar e eólica, bem como a contínua existência de plantas nucleares e bioenergéticas.

Embora a dependência energética europeia tenha ficado ainda mais em evidência nos tempos atuais, o continente vem se preparando para alterar o cenário. Em dezembro de 2019, a Comissão Europeia lançou o *European Green Deal*, que pretende transformar o continente em uma economia moderna e eficiente no quesito recursos, além de garantir que irão zerar as emissões de gases do efeito estufa até 2050, bem como separar o uso de recursos do desenvolvimento econômico. Com o comprometimento de atingirem a meta de carbono-neutro, a EU teve crescimento considerável no consumo de energias renováveis e, simultaneamente, alguns países membros anunciaram que o carvão já está no planejamento de ser eliminado nas produções de eletricidade.

Previamente citado, a transição energética cada vez se torna mais necessária, ainda mais em tempos de conflitos geopolíticos, como o que ocorre na Ucrânia. A Rússia detém a maior reserva de gás do mundo e é consequentemente o maior exportador deste gás.

Aliado a isso, é necessário que a energia produzida a partir de fontes renováveis possa ser armazenada, dado que a maior dificuldade enfrentada na implementação dessas fontes é a intermitência. Com isso, as baterias elétricas tornam-se indispensáveis em sistemas como estes, dado que com a energia produzida durante o dia, o excedente é armazenado nas baterias que alimentam todo o conjunto durante a noite, para o caso da energia solar.

Entretanto, o processo de fabricação das baterias causa efeitos negativos ao meio ambiente, sendo que a extração dos materiais que as compõem contamina os solos e água, além de causar desmatamento. A produção das baterias lança quantidades significativas de monóxido de carbono (CO) e quando as baterias atingem sua vida útil, ou são descartadas de maneira incorreta ou então são recicladas. Este último processo, por outro lado, requer alto consumo de energia e gera gases poluentes durante a atividade (ESTADÃO, 2020).

Com isso, além da procura de fontes renováveis como uma alternativa para não impactar o ambiente de forma negativa, é necessário se concentrar também em dispositivos sustentáveis

que compõem todo o sistema energético, de forma a criar uma economia circular sustentável para todo o planeta, além de lucrativa para a indústria.

Neste quesito, torna-se indispensável citar que embora carros elétricos e sistemas fotovoltaicos serem conhecidos como “limpos” e “sustentáveis”, a exploração do principal minério que compõe a bateria elétrica (íon lítio) é proveniente de áreas negativamente impactadas por tal ação. Apesar do elemento químico possuir grande vantagem na composição das baterias, 60% da produção mundial provêm das minas da República Democrática do Congo (RDC) onde a extração envolve diversas irregularidades como violações dos direitos humanos, mineração ilegal, corrupção e solos contaminados.

A demanda pelo cobalto cresceu consideravelmente devido ao desenvolvimento acelerado das tecnologias. Esse componente está presente nas baterias de íon lítio, usadas em smartphones, computadores e carros elétricos. Também podem ser encontrados nos motores de aviões, usinas nucleares, foguetes e turbinas. Combinado com outros metais, produz ligas extremamente resistentes e estáveis, que suportam temperaturas extremas. De 2016 a 2018, o preço da tonelada do cobalto foi de US\$ 26 mil (cerca de R\$ 132,6 mil) para mais de US\$ 90 mil (aproximadamente R\$ 460 mil), ainda que no ano seguinte o preço tenha caído expressivamente. Enquanto isso, crianças recebem um ou dois dólares por dia, em situações extremamente perigosas para extrair o minério (BBC, 2019).

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o uso descontrolado e excessivo de recursos disponíveis do planeta, a busca pela implementação de fontes de energia renováveis vem sendo fortemente estudada, de forma a preservar e evitar o colapso ambiental, bem como para suportar a demanda energética atual. A partir disso, a transição para um sistema energético baseado em tecnologias renováveis se torna cada vez mais interessante, resultando em consequências positivas para o desenvolvimento de um planeta mais sustentável, com menos impacto ambiental e maior eficiência.

Prevê-se que, em 2050, 84% da capacidade instalada para a geração de energia elétrica seja de origem de fontes renováveis, sendo 27,3% de fontes como eólica, solar, biomassa, entre outras e 56,7% de fonte hidráulica. Nesse âmbito, a busca por técnicas e tecnologias de armazenamento de energia elétrica torna-se fundamental, de forma a complementar e aprimorar o sistema de energia renovável, dado que a maior parte dessas energias (como a solar) são intermitentes.

1.1. FORMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O avanço das tecnologias de produção de energia elétrica está diretamente associado com a busca por formas eficazes de armazenamento desta, tanto no setor elétrico quanto em transportes, como é o caso de carros elétricos. As pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas especificamente para o armazenamento de energia têm evoluído de maneira considerável, de forma a apresentar as melhores opções de acordo com cada aplicação e com o menor impacto ambiental possível.

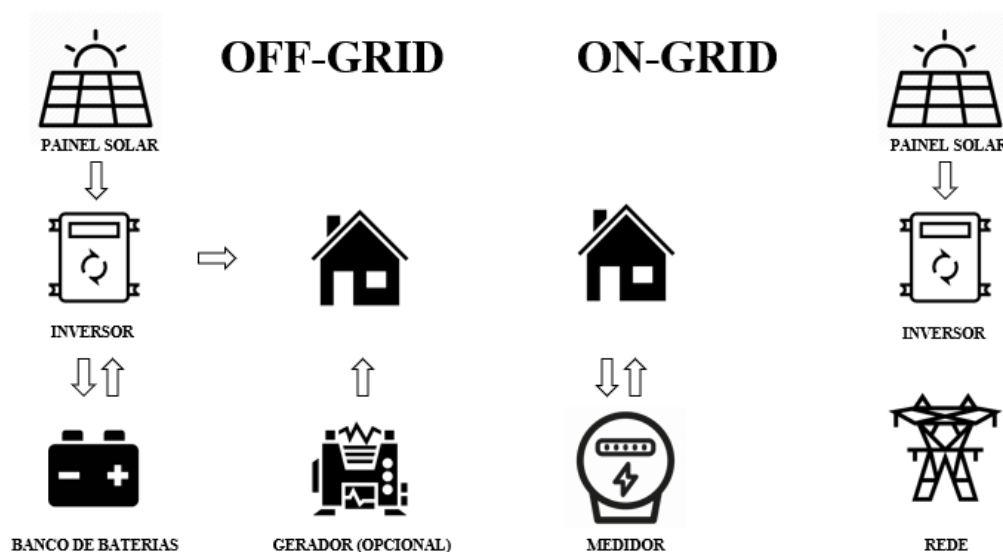
Para a energia solar, o armazenamento é imprescindível em locais remotos ou com poucas opções de geração elétrica, de forma que essa estratégia é uma das únicas opções viáveis para o constante fornecimento de energia a partir sistemas fotovoltaicos. Para isso, as baterias são empregadas para essa funcionalidade, sendo que seu uso pode ser em sistemas isolados da rede (*off-grid*) ou em sistemas híbridos conectados à rede (*on-grid*).

Para os sistemas *on-grid*, a geração de energia solar está conectada à rede elétrica, isto é, quando o sistema produz mais energia que consome, o excesso de energia é enviado à rede pública e transformado em créditos, que são utilizados na redução da conta de consumo. Em contrapartida, quando o sistema não produz energia suficiente para alimentar os dispositivos conectados a ele, a rede irá fornecer energia necessária para suprir a demanda energética.

Por outro lado, um sistema *off-grid* é totalmente dependente da disponibilidade solar e da capacidade de armazenamento de energia das baterias para alimentar todos os dispositivos conectados ao sistema. Esse banco de baterias estacionárias será responsável pelo armazenamento de energia excedente proveniente da produção dos painéis solares e, posteriormente, pelo fornecimento ao sistema quando os painéis não estiverem em funcionamento, como à noite ou dias chuvosos e nublados. Entretanto, para esse tipo de sistema, não há a possibilidade de utilizar a rede pública para suprir a demanda energética dos dispositivos caso as baterias não tenham energia suficiente.

Em ambos os sistemas, a presença de inversores é indispensável: são responsáveis pela harmonização e conversão da corrente contínua (CC) - gerada pelos painéis solares – em corrente alternada (CA). Na Figura 4 é possível observar as diferenças dos sistemas *off grid* e *on grid*.

Figura 4 - Comparativo de um sistema off grid e on grid.

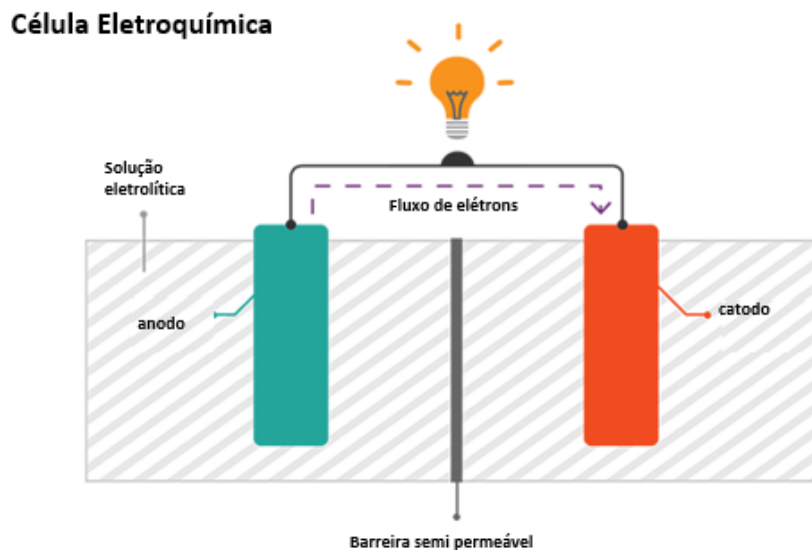


Fonte – Adaptado de: <http://www.paradisolarenergy.com/blog/difference-between-off-grid-and-on-grid-solar-energy>.
Acesso em: 22/03/2022.

Há ainda sistemas híbridos, que são conectados à rede elétrica, mas também possuem um banco de baterias para armazenar o excedente de energia gerada. Neste caso, apesar de serem considerados mais caros, não são dependentes das variações de oferta de energia quando ocorrem instabilidades na rede elétrica, podendo manter os equipamentos ligados também nestas situações.

Imprescindíveis em ambos os sistemas, as baterias são dispositivos que armazenam energia química e convertem-na em energia elétrica. As reações químicas do processo de conversão entre energia química e elétrica envolvem o fluxo de elétrons de um eletrodo para outro, através de um circuito externo. Para balancear o fluxo de elétrons, íons carregados também fluem através da solução eletrolítica, que se encontra em contato com ambos eletrodos, como se observa na Figura 5. O eletrodo com polaridade negativa é conhecido como anodo e o com polaridade positiva, catodo. Na descarga da bateria, o fluxo de elétrons flui do anodo para o catodo, ocorrendo uma reação de oxidação no terminal negativo, fazendo com que elétrons sejam liberados. O oposto acontece no terminal positivo, ocorrendo uma reação de redução no terminal positivo e elétrons sendo armazenados. Em contrapartida, durante a carga de uma bateria, os elétrons fluem do catodo para o anodo, ocorrendo o oposto: uma redução no anodo, com o recebimento de elétrons e uma oxidação no catodo, com a liberação destes.

Figura 5 - Funcionamento básico de uma bateria.



Fonte – Adaptado de: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>
Acesso em 14/03/2022

Para a composição do sistema, o eletrólito é inserido, de forma a permitir a condução de eletricidade, podendo ser líquido ou sólido. Eletrodos e eletrólitos de diferentes composições produzem diferentes reações químicas, impactando diretamente no funcionamento, tensão e quantidade de energia que pode ser armazenada na bateria.

Deve ser levado em consideração o tipo de bateria que mais se adequa ao tipo de aplicação e sistema no qual o dispositivo será inserido e, portanto, não há um tipo específico que seja versátil o suficiente para atender a todos os critérios, tais como: segurança, custos de manutenção e componentes, ciclo de vida do dispositivo, custo da bateria em si, confiabilidade e menor impacto ambiental. Em sistemas fotovoltaicos, por outro lado, há quatro tipos de baterias comumente utilizadas para o armazenamento do excedente de energia produzida ao longo do dia, sendo estas: chumbo-ácido, íon-lítio, fluxo redox e níquel cádmio.

Os conceitos de densidade de energia e potência de energia são extremamente comuns quando associados às baterias. A densidade de energia é medida em watt-horas por quilograma (wh/kg) e é a quantidade de energia que a bateria consegue armazenar com respeito à sua massa. Já a potência de energia, medida em watts por quilograma (w/kg), é a potência que pode ser gerada pela bateria com respeito a sua massa.

1.1.1. Bateria de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido foram inventadas em 1859 e possuem uma tecnologia antiga, contudo seguem sendo utilizadas até os dias atuais em automóveis. Na área de energia solar, há pouco tempo era a única utilizada para esse fim, sendo que sua capacidade de armazenamento é superior aos modelos encontrados em automóveis.

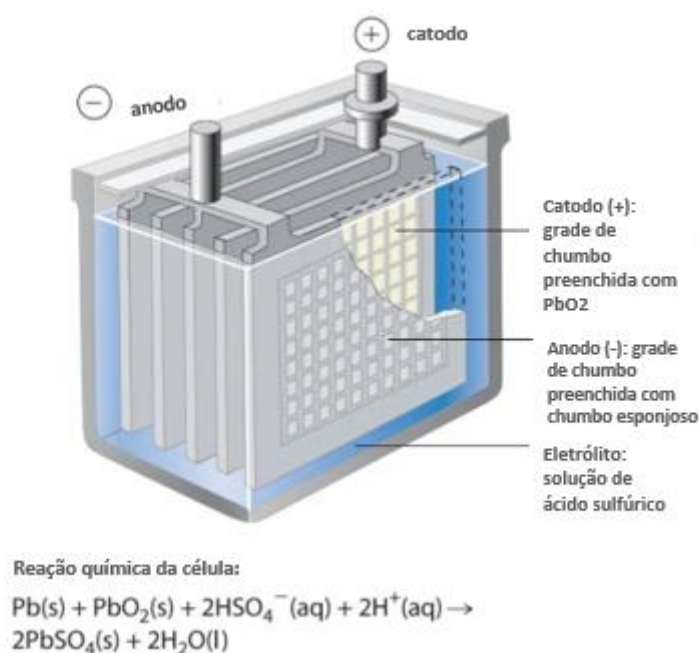
Essa categoria de baterias recarregáveis armazena energia elétrica através das reações químicas entre o chumbo (Pb), água (H₂O) e ácido sulfúrico (H₂SO₄). Mesmo possuindo uma tecnologia que data 160 anos atrás, continuam sendo utilizadas por serem confiáveis, robustas e baratas, em comparação com as outras baterias disponíveis no mercado.

As baterias de chumbo-ácido pertencem ao grupo de células eletroquímicas, explicadas anteriormente. De maneira simplificada, possuem três principais compostos:

- Placa de metal negativa (anodo) feita de chumbo;
- Placa de metal positiva (catodo) feita de dióxido de chumbo (PbO₂);
- Solução de H₂SO₄ com H₂O (eletrólito).

A partir da Figura 6, é possível observar, de forma simplificada, o interior de uma bateria de chumbo-ácido. Ao conectar os terminais positivo e negativo através de um fio condutor, a bateria inicia seu processo de geração de energia: à medida que os elétrons fluem em direção a outra placa de metal, o ácido (SO₄²⁻) que compõe o eletrólito se une ao chumbo presente nos eletrodos, restando íons de hidrogênio (H⁺) na solução aquosa e resultando em sulfato de chumbo (PbSO₄) na superfície dos terminais metálicos. Ao carregar a bateria, elétrons são adicionados de volta e a ligação química entre chumbo e ácido é quebrada, fazendo com que o SO₄²⁻ retorne à solução aquosa e recombine com H⁺. Entretanto, se a bateria estiver bastante descarregada, parte do PbSO₄ formado não será decomposto e recombinado com o íon de hidrogênio, permanecendo, portanto, nas placas de chumbo. Esse fenômeno é conhecido como sulfatação e reduz consideravelmente a vida útil da bateria em questão, de forma que elas não podem ser descarregadas mais que 60% de sua capacidade total. Adicionalmente, as baterias de chumbo-ácido costumam ser pesadas e volumosas, a baixa densidade energética e seu tempo de vida curto.

Figura 6 – Interior de uma bateria de chumbo-ácido, de forma simplificada.



Fonte - Adaptado de: <https://www.solarreviews.com/blog/lead-acid-batteries-for-solar-storage>
Acesso em: 14/04/2022.

1.1.2. Bateria de íon-lítio

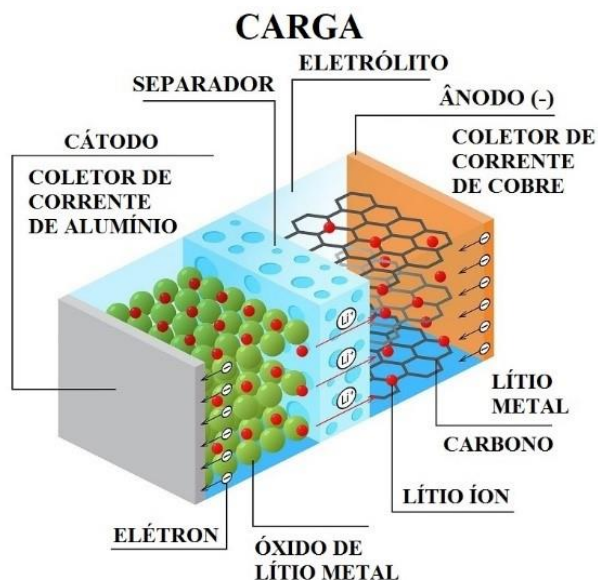
Desenvolvidas nos anos 1970 e comercializadas pela Sony em 1991, as baterias de íon-lítio, até então empregadas em computadores e *smartphones*, passaram a ser utilizadas como forma de armazenamento de energia solar e em carros elétricos há poucos mais de 10 anos. Bastante populares em diversos países, as baterias baseadas em íon-lítio possuem alta capacidade de descarga (em torno de 80%) e longa vida útil (de 13 a 18 anos).

O anodo e catodo armazenam o lítio que é o eletrólito que carrega cargas positivas do anodo pro catodo e vice versa, através do separador. O movimento dos . de lítio cria elétrons livres no anodo, que por sua vez, gera uma carga no coletor de corrente positiva. Então, a corrente elétrica flui do coletor de corrente através do dispositivo, sendo carregada (telefone, computador, entre outros) para o coletor de corrente negativa. O separador bloqueia o fluxo de elétrons dentro da bateria.

Enquanto a bateria está descarregando e provendo corrente elétrica, o anodo libera íons de lítio para o catodo, produzindo dessa forma um fluxo de elétrons de um lado para outro. Quando carregando o dispositivo, o oposto ocorre: íons lítio são liberados do catodo e recebidos

pelo anodo. O funcionamento do processo de carga e descarga da bateria de íon-lítio pode ser observada na figura 7 a seguir.

Figura 7 - Processo de carga e descarga de uma bateria de íon-lítio.



Fonte - Adaptado de: <https://www.istockphoto.com/vector/li-ion-battery-diagram-gm825367806133778177>
Acesso em 14/04/2022.

Com a evolução da tecnologia, as baterias de íon-lítio se tornaram atrativas também para o mercado de sistemas fotovoltaicos, além da grande empregabilidade em carros elétricos. Por possuírem baixa manutenção, vida útil consideravelmente longa, além de serem mais leves que as baterias de chumbo-ácido e menos sensíveis as altas temperaturas. Em contrapartida, possuem um custo inicial elevado, bem como um eletrólito altamente inflamável.

Há seis categorias de baterias de lítio, cada qual com composições e reações químicas diferentes, além de possuírem vantagens e desvantagens, a depender da melhor aplicação para cada uma. As categorias são citadas abaixo.

1.1.2.1. Fosfato de Ferro Lítio (LFP)

Sendo a categoria de baterias de lítio mais usual, estas utilizam o carbono grafítico como ânodo e fosfato como catodo. Essa combinação proporciona um bom desempenho da bateria, isto é, alta velocidade de carga e descarga, longo ciclo de vida e boa estabilidade térmica. Por conta deste último fator, as baterias LFP são bastante seguras e confiáveis.

1.1.2.2. Óxido de Lítio Cobalto (LCO)

As baterias do tipo LCO possuem elevada energia específica (Wh/kg), mas baixa potência específica, ocasionando redução da velocidade de carga e descarga.

1.1.2.3. Óxido de Manganês Lítio (LMO)

A combinação desses componentes permite elevadas correntes de carga e descarga, possuindo baixa energia específica (Wh/kg), o que ocasiona numa capacidade de armazenamento reduzida.

1.1.2.4. Óxido de Cobalto de Manganês de Níquel Lítio (NMC)

Através da combinação das características das baterias LCO e LMO, as baterias NMC são compostas por Níquel, que por sua vez, é responsável pelo aumento da energia específica (Wh/kg) e consequentemente, pelo aumento da capacidade de armazenamento da bateria. Além disso, são conhecidas por terem um bom desempenho e vida útil.

1.1.2.5. Óxido de Alumínio Cobalto Níquel Lítio (NCA)

As baterias do tipo NCA proporcionam uma elevada energia específica (Wh/kg) e potência específica considerável, além de um longo ciclo de vida.

1.1.2.6. Titanato de Lítio (LT)

As baterias LT possuem baixa energia específica e consequentemente baixa capacidade de armazenamento, mas são bastante seguras e possuem longa vida útil.

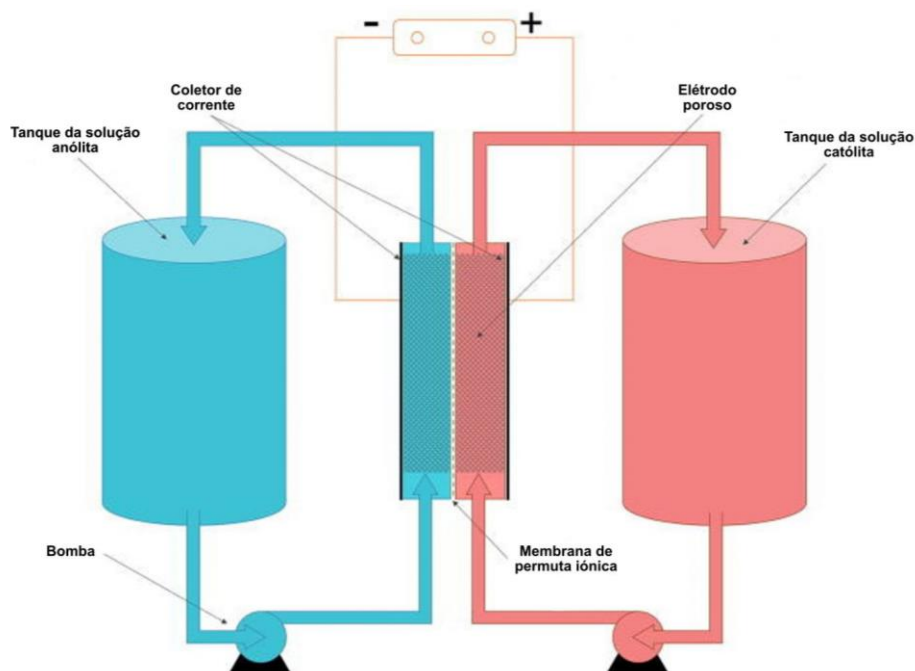
1.1.3. Bateria de fluxo redox

Baterias de fluxo são dispositivos de armazenamento de energia elétrica recarregáveis, em que fluidos que contêm materiais ativos são bombeados através de uma célula, provocando assim reações de redução/oxidação em ambos os lados da membrana de troca iônica e, consequentemente, produzirem uma diferença de potencial elétrico (ENEL, 2021). Nessa tecnologia, o eletrólito é armazenado em tanques externos, onde um corresponde ao anodo e outro, ao catodo.

As baterias de fluxo redox (BFR) se utilizam de reações de oxidação para armazenar energia nas soluções eletrolíticas, provocando dessa forma o fluxo através das células elétricas

durante o processo de carregar/descarregar (CODIBLY, 2021). são compostas por dois tanques separados, cada um com eletrólitos de diferentes composições e polaridades. Estas soluções são bombardeadas através dos eletrodos para uma célula de reação, fazendo com que as soluções fiquem separadas por meio de uma membrana semipermeável. Esta, por sua vez, permite a troca de íons e, com o fluxo destes pela membrana, uma corrente elétrica é induzida. A Figura 8 a seguir ilustra o esquema de uma bateria redox de fluxo e seus componentes.

Figura 8 - Componentes de uma bateria de fluxo redox. Imagem adaptada.



Fonte - Adaptado de: <https://www.fcencias.com/2021/09/03/sabias-que-existem-baterias-liquidas/>
Acesso em 01/06/2022.

Há inúmeras composições químicas para essas baterias, sendo as principais: óxido de ferro, brometo de zinco e enxofre aquoso. São bastante interessantes devido a possibilidade da longa duração de descarga e, para o caso das baterias de óxido de ferro, não contém nenhum elemento tóxico. Adicionalmente, não dependem de materiais como cobalto ou lítio, metais com potencial de escassez. Em contrapartida, dificilmente será encontrada em carros elétricos, por conta da inferioridade da eficiência de conversão e densidade energética quando comparadas com baterias de lítio.

1.1.3.1. Baterias de fluxo orgânicas

As baterias de fluxo orgânicas – que se utilizam de moléculas orgânicas – são uma alternativa potencialmente mais segura e econômica que as baterias de íon-lítio em grandes sistemas de armazenamento de energia renovável.

1.1.3.2.Bateria redox de vanádio (VRB)

As baterias de vanádio podem ser uma alternativa para o uso no armazenamento de energia elétrica renovável em aplicações comerciais. Se utilizam da capacidade do vanádio em permanecer em solução aquosa em quatro estados de oxidação distintos, para armazenar energia potencial química.

2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Com o desenvolvimento deste trabalho é esperado um estudo comparativo das baterias mais utilizadas, das que compõem sistemas de fontes renováveis e as tecnologias mais atrativas em termos de eficiência e custo, tendo em consideração a questão ambiental. Além disso, é previsto que o conhecimento e o aprendizado adquirido contribuam para examinar as pesquisas dessa temática em desenvolvimento. Com isso, realizar uma discussão e um comparativo dos parâmetros das soluções mais empregadas e em desenvolvimento, de forma a mostrar as áreas de aplicação mais utilizadas de acordo com cada tecnologia, levando em consideração as questões ambientais envolvidas, tanto no processo de extração e produção a reciclagem.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De forma a atender o objetivo geral, os objetivos específicos foram estipulados:

- Estudo das principais tecnologias de baterias (disponíveis e em desenvolvimento) capazes de suprir a demanda energética;
- Comparativo de termos técnicos e principais características das baterias;
- Impactos ambientais atrelados às principais tecnologias.

3. METODOLOGIA

Este trabalho teve como principal objetivo um estudo comparativo acerca das baterias utilizadas em sistemas renováveis, a partir de uma revisão bibliográfica sobre os dispositivos mais comuns e as tecnologias em desenvolvimento.

Após uma busca acerca das baterias mais utilizadas no momento atual, foi feita uma pesquisa sobre as tecnologias em ascensão, com foco nos estudos em desenvolvimento acerca das baterias de fluxo orgânicas pela *Harvard* e pela *Honeywell*, por meio de artigo científico e pelo site oficial da empresa, respectivamente. Seguido disso, buscas de estudos sendo realizados em sites de ciência e tecnologia, como *Sience Daily* e *Eneel*.

Posteriormente, foi realizada uma discussão acerca das tecnologias atuais e suas principais áreas de aplicação, além de mostrar que há estudos em andamento que buscam aliar o armazenamento de energia a partir de fontes renováveis com dispositivos que não impactem negativamente o meio ambiente ou sejam frutos de trabalho escravo ou infantil.

Por fim, foi feito um comparativo principais baterias utilizadas em sistemas renováveis – e em potencial de aplicação, como as baterias de fluxo - e seus parâmetros técnicos, como energia específica, ciclo de vida, toxicidade. A partir disso, uma discussão sobre suas características e aplicações, levando em consideração as consequências ambientais envolvidas no ciclo de vida das baterias, desde produção à reciclagem.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Associado com a queima de combustíveis fósseis, a Revolução Industrial impulsionou o crescimento violento das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Nos dias atuais e à nível global, o setor energético é um dos maiores emissores desses gases. Aliado a isso, o dia 29 de julho de 2021 foi marcado como o *Earth Overshoot Day* (Dia da Sobrecarga da Terra), isto é, a data em que a demanda da humanidade por recursos naturais é superior a capacidade da Terra de produzir ou renovar tais recursos em um ano. Mais especificamente, é necessário 1,7 planeta para sustentar nosso padrão de consumo (KUEBLER, 2021).

Inicialmente, o artigo *Energias Renováveis: um futuro sustentável*, escrito por José Goldemberg e Oswaldo Lucon, trata sobre a importância da transição por soluções energéticas renováveis e os impactos ambientais (locais, regionais e globais) bem como as possíveis soluções para desenfrear as mudanças climáticas e como as tecnologias podem contribuir para este processo. Embora seja um estudo realizado em 2006/2007, foi utilizado para melhor compreensão de como as ações humanas implicaram na situação ambiental atual e como ainda há espaço para reverter o cenário em que o planeta se encontra.

O artigo *A new way to store sustainable energy: 'Information batteries'*, da *University of Southern California* (SCIENCE DAILY, 2022) mostra uma nova forma de armazenamento do excedente de energia produzida a partir de fontes renováveis: em “baterias da informação”. Este método baseia-se em usar o excedente de energia para realizar cálculos especulativos em grandes data centers, que se utilizam de grandes quantidades de energia para seu funcionamento. Como os data centers de grandes empresas usualmente consomem muita energia (como Google e Facebook, que consomem de 10 a 50 vezes a energia de um típico edifício), a saída proposta pelos pesquisadores consiste em utilizar mecanismos pelos quais o excedente de energia (solar ou eólica) possa ser armazenado na forma de computação: quando há excedente de energia, ele será utilizado para realizar cálculos especulativos nos grandes data centers. De maneira a exemplificar, os data centers do YouTube diariamente transcodificam mais de 700.000 horas de vídeos de diferentes resoluções, sendo que muitos desses cálculos realizados são previsíveis e poderiam ser computados no momento em que há o excedente de energia renovável. Dessa forma, os dados seriam armazenados e utilizados quando solicitados, evitando realizar tais cálculos quando houvesse menor oferta de energia verde. (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2022). Foi um estudo que permitiu olhar para outras formas de armazenamento de energia proveniente de sistemas renováveis.

O artigo de pesquisa *A Sodium-Antimony-Telluride Intermetallic Allows Sodium-Metal Cycling at 100% Depth of Discharge and as Anode-Free Metal Battery*, escrito por Yixian Wang, Hui Dong, Naman Katyal, Hongchang Hao, Pengcheng Liu, Hugo Celio, Graeme Henkelman, John Watt e David Mitlin verifica não só o desenvolvimento de novas tecnologias, mas a busca pela melhora de tecnologias já existentes. Neste caso, o estudo exhibe a pesquisa acerca da substituição do elemento Lítio (Li) por Sódio (Na) através de sucessivas dobras e enrolamentos de placas finas de Na, com uma camada de pó de antimônio e telúrio, resultando o material NST-Na. Essa tecnologia possui grande potencial de atuar como bateria com plena capacidade de recarga, eliminando dessa forma a necessidade do Li, material que apresenta potencial de escassez, além do Cobalto (Co), em que atividades de extração estão fortemente ligadas a atividades danosas ao meio ambiente.

Há um estudo em desenvolvimento que prevê que em usinas *offshore* (eólica, solar e maremotriz) seja possível utilizar a bateria oceânica, isto é, um reservatório de capacidade de até 20 milhões de litros de água em baixa pressão colocado no fundo do mar. O reservatório é composto por um sistema de turbinas e bombas que conecta o reservatório a uma “bexiga flexível” e, ao receber o excedente de energia, a água é bombardeada do reservatório para a bexiga. Quando há a necessidade de energia, a bexiga, por sua vez, libera a água de volta ao reservatório, com o auxílio da pressão do mar, girando turbinas durante o processo e, conseqüentemente, gerando eletricidade. De acordo com a empresa responsável por desenvolver o projeto, a bateria oceânica possui baixo custo de manutenção, além de ser eficiente. (OCEAN GRAZER, 2014).

Além disso, também existe a possibilidade de substituir o lítio por metais leves, como o sódio, elemento químico bastante abundante. Embora as baterias de sódio não sejam capazes de atingir a mesma densidade energética que as baterias de lítio, os catodos de óxido de sódio não requerem cobalto para o funcionamento. Os processos de fabricação dessa categoria de baterias se assimilam com as baterias de lítio, o que permite uma readaptação das linhas de produção, acarretando em menores custos da transição da produção das baterias de sódio (NEW CHARGE ENERGY, 2020).

5. ANÁLISE E DISCUSSÕES

As baterias são dispositivos essenciais para a transição energética de um mundo mais sustentável, na busca pela independência de combustíveis fósseis e maior utilização de fontes renováveis. A partir disso, as baterias recarregáveis de lítio foram essenciais para contribuir para este processo, tendo revolucionado desde o mercado de eletrônicos portáteis a veículos elétricos e residências. Entretanto, estudos mostram que as baterias de lítio não são completamente sustentáveis e estão distante de ter seu ciclo de vida – desde a manufatura a descarte – sustentável. A começar pelo processo de extração do lítio, que pode ser feito de duas maneiras: através da extração pela evaporação, nas salinas localizadas na Argentina e Chile, e pela extração do minério espodumeno, nas minas da Austrália e China. A primeira forma utiliza grandes quantidades de água para o processo de extração, além da reserva estar localizada em locais com pouca disponibilidade de água. Já a segunda maneira de se extrair o lítio é ainda mais complicada, já que a disponibilidade do minério se dá em minas de rocha dura. Esse processo conta com a extração do mineral e em seguida este é torrado utilizando combustíveis fósseis. O impacto ambiental desse método vai desde o uso de grandes quantidades de água, alteração da paisagem a liberação de 15 toneladas de CO₂ para cada tonelada de lítio (BBC, 2020). Ainda, algumas baterias de lítio contêm cobalto, cuja extração envolve problemas sociais e ambientais, já que é um minério tóxico. A Tesla, por sua vez, divulgou que quase metade dos veículos produzidos no primeiro trimestre do ano de 2022 contaram com baterias do tipo LFP. (CNN, 2022). Estas baterias, por sua vez, são uma opção economicamente mais interessante que as baterias a base de níquel e cobalto, além de terem grande durabilidade e ciclo de vida e serem consideradas seguras. O fato de possuírem diferentes composições químicas dificulta o processo de reciclagem das baterias de lítio como um todo, já que muitos produtores não revelam as proporções dos minérios utilizados, dificultando a padronização e automatização da reciclagem. Com o elevado consumo de energia e água para reciclar as baterias, se torna economicamente mais viável comprar matéria prima e produzir um novo dispositivo.

A bateria de chumbo-ácido, embora não sejam as mais empregadas no presente momento, ainda são utilizadas em aplicações industriais ou em sistemas *off-grid*. Os materiais que compõem essa categoria de baterias pode causar inúmeros danos ao ecossistema - desde poluição a vazamentos e contaminação do solo - e à vida humana. O chumbo é um material tóxico e a exposição à ele pode causar efeitos adversos no sistema nervoso, medula óssea e rins, podendo até interferir em processos genéticos ou cromossômicos (da CRUZ, 2012). Entretanto,

tanto o chumbo quanto seus componentes - ainda que tóxicos e prejudiciais tanto ao meio ambiente quanto aos humanos - estão na parte interna da estrutura da bateria e na forma sólida, impedindo a exposição. Por outro lado, em torno de 80% das baterias de chumbo-ácido são recicladas.

No que diz respeito às baterias de fluxo de vanádio, são a categoria de baterias mais recicladas disponível no mercado atual, isso se dá por terem em maior parte de sua composição materiais não tóxicos como ligas recicláveis, plásticos e eletrônicos genéricos. Além disso, as baterias de fluxo de vanádio não são inflamáveis nem explosivas e sendo, portanto, uma alternativa extremamente segura quando comparadas com as baterias de Li-Ion ou chumbo-ácido. Entretanto, a exposição ao vanádio pode causar irritação aos pulmões, ocasionar bronquite, tosse e encurtamento da respiração.

Ainda no âmbito das baterias de fluxo, há um estudo promissor na categoria de baterias orgânicas. Pesquisadores da Universidade de Harvard desenvolveram uma bateria de fluxo orgânica que é capaz de armazenar energia em moléculas orgânicas que se dissolvem em água, com pH neutro. Com isso, essa nova química possibilita a produção de uma bateria não corrosiva, não tóxica e com uma vida útil consideravelmente longa, além da possibilidade de diminuição de custos de produção.

Os pesquisadores encontraram o alto desempenho da bateria em questão ao demonstrar que uma nova molécula orgânica, apelidada de quinona de Matusalém – uma homenagem à figura com vida mais longa da bíblia – possui característica de armazenamento e liberação de energia incontáveis vezes em períodos de vários anos.

Através de experimentos, apresentaram uma nova molécula orgânica que sobrevive e supera seus antecessores, oferecendo a bateria de fluxo orgânico de alto desempenho mais duradoura até o momento. Essa molécula poderia armazenar e liberar energia de maneira útil dezenas de milhares de vezes em períodos de vários anos antes de se decompor. A Matusalém é uma quinona previamente modificada, podendo ser encontrada e encontrada de forma abundante e natural, fazendo parte integral de processos biológicos, como fotossíntese e respiração celular (HARVARD, 2018).

Os experimentos laboratoriais mostraram que a molécula foi capaz de apresentar uma taxa de desvanecimento menor que 0,01% por dia e menos que 0,001% por ciclo de carga/descarga, ultrapassando, dessa forma, para menos de 3% de degradação ao longo de um ano, além de

tempo de operação útil de inúmeros ciclos. Adicionalmente, ela se provou capaz de armazenar mais energia num espaço menor e, por operar em um eletrólito alcalino fraco, é reduzido o custo da bateria através do uso de componentes de contenção de baixo custo, além da membrana de polímero – também de baixo custo – que é responsável por separar os terminais de polaridades opostas.

5.1. ANÁLISE COMPARATIVA

Com o estudo desenvolvido, é possível perceber que as tecnologias de baterias são variadas e possuem diferentes estágios de desenvolvimento, além de terem vantagens e desvantagens a depender da aplicação.

As baterias de chumbo-ácido, por exemplo, são recomendadas somente para sistemas *off-grid* (WOLF, 2020). As suas principais desvantagens são a baixa vida útil (1000-3000 ciclos), duração de dois a oito anos a depender da quantidade de recargas diárias, o desempenho que drasticamente cai quando em ambientes com temperatura acima de 20°C, e por ser necessário utilizar apenas 60% da capacidade total da bateria, de forma a não prejudicar sua vida útil.

As baterias de íon-lítio, amplamente utilizadas nas mais diversas tecnologias (desde aparelhos eletrônicos a carros elétricos e casas inteligentes), também podem não ser uma alternativa eternamente disponível, já que especialistas acreditam que essa tecnologia não será capaz de suprir toda a demanda do mercado, devido ao seu alto custo, ainda que a redução de seu preço durante os últimos dez anos tenha sido de quase 90%. Além disso, grande parte dos catodos da bateria de íon-lítio possuem cobalto, que contribui para o aumento da condutividade e estabilidade da bateria durante os ciclos de carga e descarga. O cobalto, por sua vez, é um metal tóxico e cuja mineração ocorre em condições extremamente precárias.

Por outro lado, os sistemas que possuem baterias de fluxo para o pleno funcionamento são constituídos de matérias primas consideradas não essenciais - no âmbito da disponibilidade e concorrência – e com menor impacto ambiental. No que diz respeito a segurança do sistema como um todo, as baterias de fluxo apresentam confiabilidade dado que contam com um sistema de operacional com menor criticidade de produção quando comparadas com as de íon-lítio.

O aumento do uso destas baterias em fontes renováveis vem sendo observado à medida que se busca soluções melhores de armazenamento de energia atrelada a sustentabilidade. Além disso, a vantagem econômica é outra grande característica a ser considerada em sistemas que possuem BFRs, que por sua vez, torna-se cada vez mais propensa a ter custos de produção

diminuídos com os avanços em estudos e pesquisas. Do ponto de vista de durabilidade, o ciclo de vida das BFRs é uma das características mais atrativas, já que essa categoria permite um grande número de ciclos completos de carga e descarga. De forma adicional, o método de esfriamento convectivo dos eletrodos auxilia no gerenciamento e distribuição do calor. Outra grande vantagem é que são ideais em aplicações que requerem longos períodos de dispositivos em desuso, já que as BFRs não irão descarregar devido ao eletrólito de transporte de carga ser armazenado em outro reservatório. A performance das BFRs não é afetada pelas taxas de carga e descarga, fazendo com que essa categoria de baterias seja ideal para sistemas de gerenciamento de energia complexos.

Ainda na categoria de baterias de fluxo redox, as VFBs são extremamente seguras, mais escaláveis, flexíveis sob o ponto de vista operacional, não inflamáveis, descarregam 100% a energia armazenada e, em comparação com o Li, o vanádio encontra-se mais disponível que o elemento citado. Embora seja uma opção bastante atrativa, é necessário ressaltar que os íons do vanádio apresentam pouca estabilidade, sendo necessário o acréscimo de outro ácido na solução que os compõem. Essa adição de ácido resulta na ampliação da faixa de temperatura, aumento da cinética de reação e acréscimo da densidade de energia. Com isso, o custo de preparação do eletrólito nos custos totais de instalação das baterias pode variar de 35 a 80%, a depender do tamanho e da capacidade em kWh da instalação. (UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, 2019). As maiores reservas do minério vanádio se concentram na China, Rússia e África do Sul. Na América do Sul, a única reserva do minério encontra-se na Bahia e é a mina que produz o vanádio mais puro do mundo. (NOTAS GEO, 2017). Em termos de custo, os preços do pentóxido de vanádio e do ferro-vanádio possuem comportamento volátil. Embora as baterias convencionais sejam predominantes no quesito de armazenamento de energia, é importante estar atento as novas tecnologias em desenvolvimento, que visam não só a eficiência em sistemas renováveis, mas que prezam pela sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

Aliado a isso, inúmeros estudos em andamento mostram que é possível aliar a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis com dispositivos que também não são nocivos ao meio ambiente ou, idealmente, não possuem em sua cadeia de produção produtos que impactem negativamente o meio ambiente ou frutos de trabalho escravo e infantil.

Para baterias de fluxo, há duas tecnologias que se encontram nessa categoria, sendo elas: mega bateria de fluxo orgânica, de Harvard (HARVARD, 2018) e a bateria de fluxo da empresa Honeywell (HONEYWELL, 2021). Ainda que em fase experimental, a bateria de fluxo

desenvolvida pelos pesquisadores do departamento de Engenharia de Harvard também possui grande potencial de aplicação em indústrias. Já a bateria de fluxo da Honeywell, também uma solução para aplicações em larga escala, se utiliza de um eletrólito seguro e não inflamável, capaz de armazenar e descarregar o excedente de energia elétrica produzida em fontes renováveis por até doze horas, isto é, três vezes mais que a capacidade das baterias de íon lítio. Ainda, a empresa garante que o dispositivo foi feito com componentes recicláveis e que o sistema tenha desempenho por até 20 anos. No presente momento, a tecnologia encontra-se em fase experimental, nos Estados Unidos e tem objetivo de implementar um projeto piloto a partir de 2023.

No setor de transportes, os carros elétricos se tornaram extremamente conhecidos, muito pela popular ideia de economia de combustível. O alto custo de um veículo elétrico, por outro lado, se torna um dos principais motivos pelo qual ainda não dominou o mercado. A razão mais expressiva para esse fato é o alto custo das baterias que o compõe, sendo as mais comuns do tipo íons de lítio. Embora a ideia de preservação e conservação do meio ambiente se torne uma das propagandas de forma a convencer o consumidor a adquirir tal categoria de veículos, não se pode afirmar com plena certeza que todo o processo seja carbono-neutro. Isso se dá tanto por conta do processo de fabricação das baterias quanto do tipo de fonte de energia que é utilizado para carregar os carros elétricos. Por outro lado, há diversos estudos em andamento, inclusive da própria Tesla, que busca por maneiras de eliminar os componentes nocivos ao meio ambiente, sem renunciar pela qualidade e eficiência, além de promover a reciclagem completa de suas baterias.

É possível realizar um comparativo das baterias utilizadas atualmente em sistemas renováveis – e em potencial de aplicação, como é o caso da bateria de fluxo vanádio - tendo em consideração as vantagens e desvantagens, as principais aplicações e os impactos ambientais atrelados às baterias estudadas, podendo ser observado nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1 - Análise de vantagens e desvantagens.

Chumbo-Ácido	Lítio	Fluxo
Baixa vida útil	Incapaz de suprir demanda do mercado	Mais eficiente que a chumbo-ácido
Limitação de 60% do uso da capacidade total pelo efeito de sulfatação	Possuir cobalto nas baterias	Necessita de espaço para armazenamento
Inferiores às baterias de lítio (densidade e eficiência)	Alto custo	Alto custo de implementação
Alta toxicidade	Pode ser tóxica	Não tóxica

Fonte - Autoria própria.

Tabela 2 – Principais aplicações das baterias.

Chumbo-Ácido	Lítio	Fluxo
Carros a combustão	Dispositivos eletroportáteis	Conjuntos residenciais
Sistemas off-grid	Veículos elétricos	Sistemas off-grid

Fonte - Autoria própria.

Tabela 3 - Análise dos impactos ambientais das baterias.

Chumbo-Ácido	Lítio	Fluxo
-	Processo de Extração utiliza grandes quantidades de água	Não contém substâncias tóxicas
Mais de 80% recicladas	Menos de 5% recicladas	Componentes são recicláveis
Processo de reciclagem informal	Destinadas a aterros sanitários	-
Envenenamento de chumbo em crianças	Contaminação do solo e lençóis freáticos	-

Fonte: Autoria própria.

Em termos gerais, é possível verificar as três baterias e suas principais características na Tabela 4. As baterias de lítio possuem vantagens e desvantagens, a depender de cada aplicação. É importante ressaltar que essa categoria de baterias elétricas possuem custo significativamente elevado em comparação com as outras baterias - sendo difícil precificar o valor de cada pois varia a forma na qual são ajustadas e a depender de onde serão utilizadas. Ainda assim, essa tecnologia tem permitido um maior avanço em sistemas de armazenamento de energia proveniente de fontes renováveis e popularização de veículos elétricos. Em termos ambientais, sabe-se que a questão da extração do lítio é problemática e envolve desde a utilização de grandes quantidades de água até o processo de queima de combustíveis fósseis e consequentemente a liberação de gases poluentes. Adicionalmente, as baterias destinadas a reciclagem são uma parcela insignificante: menos de 5% das baterias de lítio são recicladas (JACOBY, 2019). Isso se dá pela complexidade do processo de reciclagem, mas também por ser economicamente mais

fácil e barato comprar uma bateria nova do que submeter a todo o processo de destinação correta. Com isso, as baterias acabam em aterros sanitários e contaminando o solo e lençóis freáticos. Ainda, é de comum censo que o lítio será incapaz de suprir a demanda do mercado e, dessa forma, solucionar a questão da reciclagem das baterias dessa categoria não só ajudará a atender a demanda energética, mas também prezar pela preservação do meio ambiente.

Tabela 4: Comparativo das características das baterias abordadas.

Parâmetro	Tipo de bateria				
	Lítio			Chumbo-ácido	Bateria de Fluxo Vanádio
	LFP	LMO	LCO		
Energia Específica (Wh/kg)	90-120	100-150	150-250	30-40	Varia (porém menor que lítio)
Eficiência	98%			60%	65-85%
Ciclo de vida (Profundidade de Descarga) Depth of Discharge	1000-2000	500-1000	500-1000	200-300	>200 000
Tempo de Carga	1-2h	1-2h	2-4h	8-16h	3-10h
Toxicidade	Baixa			Alta	Sem substâncias tóxicas
Temperatura de Carga	0°C a 45°C			-20°C a 50°C	Temperatura ambiente
Temperatura de Descarga	-20°C a 60°C				
Requisitos de Segurança	Não necessita de manutenção			Termicamente estável	
Custo	Alto			Médio	Alto
Aplicação	Carros elétricos (Tesla), bicicletas e aplicações de armazenamento comercial de energia	Instrumentos médicos, veículos híbridos e elétricos	Celulares, tablets, notebooks e câmeras	Carros a combustão, sistemas industriais e sistemas <i>off-grid</i>	Locais com espaço para armazenamento do sistema/tanques, sistemas industriais

Fonte: Adaptado de: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>

Acesso em: 03/05/2022.

Já baterias de chumbo-ácido, por outro lado, quando comparada com a bateria de Li-Ion são ligeiramente inferiores no que diz respeito a densidade de energia e eficiência. Ainda assim, são uma opção economicamente viável em sistemas de armazenamento *off-grid*, isto é, em sistemas não utilizados com tanta frequência devido a sua robustez, a não necessidade de manutenção e sistemas complexos para controle e monitoramento. Apesar disso, tem-se a limitação pelo seu uso em até 60% da capacidade total devido ao efeito de sulfatação, que diminui consideravelmente sua vida útil. Em termos ambientais, cerca de 80% das baterias de chumbo-ácido são recicladas, tornando-as a categoria de baterias mais recicladas nos tempos

atuais. Entretanto, o processo de reciclagem é realizado informalmente, sendo que a atividade – concentrada na região da Índia – envolve problemáticas desde ilegalidade e instrução precária dos trabalhadores, que acabam levando consigo resíduos das fábricas de reciclagem e, portanto, expondo não somente a si próprios mas também o ambiente familiar como um todo (UNICEF, 2020). Este problema pode ser resolvido regularizando e reformando os locais onde se realiza o processo de reciclagem, além de instrução da população quanto à toxicidade do chumbo e medidas de segurança.

Em contrapartida, as baterias de fluxo, apesar de parecerem extremamente atrativas nos quesitos eficiência, toxicidade e menor impacto ambiental, podem ter um custo elevado – a depender do composto químico e da quantidade de material - necessitam de locais com espaço de armazenamento considerável, já que a tecnologia é composta por grandes tanques, tornando-as inviáveis em aplicações móveis, como veículos elétricos, ou domésticas em grandes cidades.

6. CONCLUSÃO

Com o presente estudo comparativo foi possível apresentar as diversas soluções que estão sendo utilizadas, além das tecnologias em desenvolvimento que prometem não só melhorar a eficiência do método de armazenamento do excedente de energia de fontes renováveis, mas causar o menor impacto possível. Foi mostrado também um comparativo das principais baterias utilizadas em sistemas de armazenamento de energias renováveis e suas principais características, no que diz respeito a densidade de energia, ciclo de vida, toxicidade, custo financeiro e aplicações.

Nota-se que o trabalho desenvolvido exhibe um estudo acerca das principais tecnologias de baterias – disponíveis e em desenvolvimento – mais interessantes nas aplicações de sistemas com produção de energia renovável, sem deixar de analisar o processo de extração dos minérios que compõe as diferentes baterias ao processo de reciclagem destas.

É notável que não existe uma bateria que seja considerada ideal e versátil para qualquer aplicação, sendo necessário observar diversos aspectos - como técnicos e econômicos – para a escolha da tecnologia mais adequada. A partir disso, as soluções apresentadas têm vantagens e desvantagens, a depender do sistema na qual serão inseridos e dos fatores a serem considerados. É importante ressaltar que há um longo caminho a ser percorrido no que diz respeito ao desenvolvimento de novas tecnologias, como falta de incentivo econômico, barreiras regulatórias, pouco interesse no mercado em utilizar as tecnologias a pouco desenvolvidas - por conta de incertezas e riscos - falta de conhecimento necessário das partes interessadas e, por último, alto custo das tecnologias.

Dessa forma, observa-se que ainda que muitos estudos estejam em desenvolvimento e há grandes oportunidades que visam não somente os aspectos físicos das tecnologias, mas também as questões ambientais. As grandes empresas de tecnologia estão cientes de que uma mudança de pensamento deve ser feita e atingida para que haja uma perfeita harmonia entre os objetivos financeiros com o bem estar social e ambiental.

REFERÊNCIAS

A new way to store sustainable energy: 'Information batteries'. 2022. University of Southern California. **Science Daily**. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedaily.com/releases/2022/02/220201115247.htm>>. Acesso em 08 mai. 2022.

A third of the world's children poisoned by lead, new groundbreaking analysis says. **UNICEF**. 2020. Disponível em: <<https://www.unicef.org/turkey/en/press-releases/third-worlds-children-poisoned-lead-new-groundbreaking-analysis-says>>. Acesso em: 20/07/2022.

BATERIAS de Informação: Uma nova maneira de armazenar energia sustentável. **Inovação Tecnológica**. 2022. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=baterias-de-informacao&id=010115220202#.YprCjajMLIU>>. Acesso em 03 jun. 2022.

BHATT, Dr Anand; WITHERS, Professor Ray; FORSYTH, Professor Maria; WANG, Professor Guoxiu. How a battery works. **Australian Academy of Science**. Disponível em <<https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>>. Acesso em 02 mar. 2022.

BURROWS, Leah. Organic Mega Flow Battery transcends lifetime, voltage thresholds. **Harvard School of Engineering and Applied Sciences**. 2018. Disponível em: <<https://www.seas.harvard.edu/news/2018/07/organic-mega-flow-battery-transcends-lifetime-voltage-thresholds>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

BU-203: Nickel-based batteries. **Battery University**. 2021. Disponível em: <<https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries>>. Acesso em 03 mai. 2022.

CLIFFORD, Catherine. How Europe can reduce its dependence on Russian natural gas. **CNBC**. 2022. Disponível em <<https://www.cnn.com/2022/03/07/how-europe-can-reduce-dependence-on-russian-gas-according-to-iea.html>>. Acesso em 07 mar. 2022.

CONSUMO de energias fósseis é de 80% do total, igual a dez anos atrás. **Uol**. 2021. Disponível em <<https://economia.uol.com.br/noticias/afp/2021/06/15/consumo-de-energias-fosseis-e-de-80-do-total-igual-a-dez-anos-atras.htm>>. Acesso em 16 out. 2021.

DA CRUZ, Nathalia Rother. Exposição Ambiental ao Chumbo: Um Problema de Áreas Contaminadas Próximas a Fábricas de Baterias. **Universidade Estadual Paulista – UNESP**. 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118807/cruz_nr_tcc_bauru.pdf?sequence=1>. Acesso em 07/07/2022.

EARLY, Catherine. Lithium is crucial for the transition to renewables, but mining it has been environmentally costly. Now a more sustainable source of lithium has been found deep beneath our feet. **BBC**. 2020. Disponível em <<https://www.bbc.com/future/article/20201124-how-geothermal-lithium-could-revolutionise-green-energy>>. Acesso em 07/07/2022.

ESTEVES, Eduarda. Abastecimento: entenda quais os produtos que o mundo mais compra da

Rússia e da Ucrânia. **Elas Que Lucrem**, 2022. Disponível em <<https://www.eql.com.br/financas/2022/02/abastecimento-entenda-quais-sao-os-produtos-que-o-mundo-mais-compra-da-russia-e-da-ucrania/>>. Acesso em 07 mar. 2022.

GLOBAL Energy Review 2021: Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021. **International Energy Agency**. 2021. Disponível em <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2021.

GOLDEMBERG, José; Lucon, Oswaldo. Energias Renováveis: um futuro sustentável. 2006. **REVISTA USP**, São Paulo, n.72, p. 6-15, 2006. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13564/15382>>. Acesso em 15 out. 2021.

GONZALEZ, Marco. Procura-se vanádio para estocar vento e sol. **Notas Geo**. 2017. Disponível em: <<https://www.notasgeo.com.br/2017/11/fatos-procura-se-vanadio-para-estocar.html>>. Acesso em: 05/06/2022.

HONEYWELL Introduces New Flow Battery Technology To Provide Safer, Durable Solution For Large-Scale Renewable Energy Storage. 2021. **Honeywell**. 2021. Disponível em: <honeywell.com/us/en/press/2021/10/honeywell-introduces-new-flow-battery-technology-to-provide-safer-durable-solution-for-large-scale-renewable-energy-storage>. Acesso em 26 abr. 2022.

HOROWITZ, Julia. Entenda o que acontece se a Rússia cortar o fornecimento de gás à Europa. **CNN**, 2022. Disponível em <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/entenda-o-que-acontece-se-a-russia-cortar-o-fornecimento-de-gas-a-europa/>>. Acesso em 09 mar. 2022.

HOW does a Lithium-ion battery works? **Energy.gov**. 2017. Disponível em <<https://www.energy.gov/eere/articles/how-does-lithium-ion-battery-work>>. Acesso em 17 mar. 2022.

JACOBY, Mitch. It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries. **Chemical and Engineering News**. 2019. Disponível em: <<https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>>. Acesso em: 20/07/2022.

JIN, Hyunjoo; LIENERT, Paul. Elon Musk apostas em baterias de ferro e lítio para Tesla. 2022. **CNN Brasil**. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/elon-musk-apostas-em-baterias-de-ferro-e-litio-para-tesla/>>. Acesso em: 10/07/2022.

KIRBY, Paul. Why has Russia invaded Ukraine and what does Putin want? **BBC**, 2022. Disponível em <<https://www.bbc.com/news/world-europe-56720589>>. Acesso em 07 mar. 2022.

KUEBLER, Martin. Earth Overshoot Day moves forward by nearly a month. **DW**, 2021. Disponível em <<https://www.dw.com/en/earth-overshoot-day-moves-forward-by-nearly-a-month/a-58612967>>. Acesso em 24 fev. 2022. **MATRIZ Energética e Elétrica**. 2021. **Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 20/07/2022.

O que leva Apple, Google, Tesla e outras empresas a serem acusadas de lucrar com trabalho

infantil na África. **BBC**, 2019. Disponível em <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-50828077#:~:text=A%20Rep%C3%ABlica%20Democr%C3%A1tica%20do%20Congo,do%20suprimento%20mundial%20de%20cobalto.&text=No%20entanto%2C%20a%20extra%C3%A7%C3%A3o%20est%C3%A1,humanos%2C%20minera%C3%A7%C3%A3o%20ilegal%20e%20corrup%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em 01 mar. 2022.

PRODUÇÃO de veículos elétricos pode causar danos ambientais. **Estadão**, 2020. Disponível em <<https://summitmobilidade.estadao.com.br/guia-do-transporte-urbano/producao-de-veiculos-eletricos-pode-causar-danos-ambientais/>>. Acesso em 10 mar. 2022.

RÚSSIA x Ucrânia: o gasoduto vital ameaçado pelo conflito. **BBC**, 2022. Disponível em <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-60317372>>. Acesso em 05 mar. 2022.

SISTEMAS de Armazenamento com baterias de fluxo. **Enel**. Disponível em: <<https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/armazenamento/baterias-de-fluxo>>. Acesso em 15 abr. 2022.

SOARES, A.B. , Alcântara. E.M. , De Andrade Lima, L.R.P. **Baterias de Vanádio para estocagem de energia limpa.**, 2019. Disponível em: <<https://www.artigos.entmme.org/download/2019/SOARES,%20A.B.,%20ALC%C3%82NTARA,%20E.M.,%20DE%20ANDRADE%20LIMA,%20L.R.P.-%20BATERIAS%20DE%20VAN%C3%81DIO%20PARA%20ESTOCAGEM%20DE%20ENERGIA%20LIMPA.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2022.

TOLEDO, Thiago; CARNEIRO, Priscila. Matriz Energética. **FGV Energia**, 2020. Disponível em <<https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>>. Acesso em: 15 out. 2021.

UTILITY scale offshore energy storage. **Ocean Grazer**. Disponível em: <<https://oceangrazer.com/>>. Acesso em 07 mai. 2022.

VANTAGENS e limitações das baterias de Níquel Cádmio. **STA**. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-nicd/vantagens-e-limitacoes-das-baterias-de-niquel-cadmio-nicd>>. Acesso em 03 mai. 2022.

WOLF, Sara. The difference between Off-Grid and On-Grid Solar Energy. **Paradise Energy Solutions**. Disponível em <<http://www.paradisepolarenergy.com/blog/difference-between-off-grid-and-on-grid-solar-energy>>. Acesso em 24 fev. 2022.