

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Rafaella Maria Brandão Prado

Análise de Viabilidade Econômica de Baterias de Segunda Vida em Prossumidores
Residenciais sob as Perspectivas da REN 482 e Lei 14.300

Juiz de Fora

2024

Rafaella Maria Brandão Prado

Análise de Viabilidade Econômica de Baterias de Segunda Vida em Prossumidores Residenciais sob as Perspectivas da REN 482 e Lei 14.300

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia

Orientador: Prof. Bruno Henriques Dias, D. Sc.

Coorientadores:

Prof. Leonardo de Arruda Bitencourt, D. Sc.

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc.

Juiz de Fora
2024

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Maria Brandão Prado, Rafaella.

Análise de Viabilidade Econômica de Baterias de Segunda Vida em Prossumidores Residenciais sob as Perspectivas da REN 482 e Lei 14.300 / Rafaella Maria Brandão Prado. -- 2024.

69 f.

Orientador: Bruno Henrique Dias

Coorientadores: Leonardo de Arruda Bitencourt, Leonardo Willer de Oliveira

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024.

1. Baterias de Segunda Vida. 2. Sistemas de Compensação. 3. Prossumidores. I. Henrique Dias, Bruno, orient. II. de Arruda Bitencourt, Leonardo, coorient. III. Willer de Oliveira, Leonardo, coorient. IV. Título.

Rafaella Maria Brandão Prado

Título: Análise de Viabilidade Econômica de Baterias de Segunda Vida em Prossumidores Residenciais sob as Perspectivas da REN 482 e Lei 14.300

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia

Aprovada em 27 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Bruno Henriques Dias, D. Sc. - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Leonardo de Arruda Bitencourt, D. Sc - Coorientador
Universidade Federal Fluminense

Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Francisco Carlos Rodrigues Coelho, D.Sc.
Universidade Federal de São João del-Rei

Igor Delgado de Melo, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Henriques Dias, Coordenador(a) em exercício**, em 27/02/2024, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Delgado de Melo, Professor(a)**, em 27/02/2024, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Willer de Oliveira, Professor(a)**, em 27/02/2024, às 16:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Carlos Rodrigues Coelho, Usuário Externo**, em 27/02/2024, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafaella Maria Brandão Prado, Usuário Externo**, em 27/02/2024, às 17:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo de Arruda Bitencourt, Usuário Externo**, em 28/02/2024, às 18:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1673766** e o código CRC **6882FCBD**.

Dedico este trabalho aos meus pais que me inspiram e me dão propósito para continuar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a oportunidade de conclusão desta etapa. A jornada não foi fácil, mas desistir nunca foi uma opção.

Agradeço especialmente aos mestres do PPEE-UFJF que, por diversas vezes, me presentearam com empatia e suporte, mostrando compreensão por aqueles que, como eu, precisam conciliar estudos e trabalho, e me incentivando a não desistir.

Agradeço especialmente ao meu orientador Bruno Dias e coorientador Leonardo Bitencourt pelo apoio, paciência e sapiência durante todo o processo, apesar das dificuldades.

“Poucas coisas são impossíveis à diligência e à habilidade... As grandes tarefas não são executadas pela força, mas sim pela perseverança.” (Samuel Johnson, 1709-1784)

RESUMO

Baterias e sistemas de armazenamento de energia, em geral, têm sido tecnologias cada vez mais difundidas e pesquisadas. Sua escolha compreende aspectos relativos à composição, tamanho e a suas capacidades de armazenamento e potência instalada. Tais fatores são decididos e dimensionados de acordo com a aplicação escolhida. A inserção dessa tecnologia na rede elétrica gera impactos e alterações não só no sistema interligado como também nos mercados de energia. A energia proveniente dos sistemas de armazenamento pode ser comercializada em múltiplos mercados: *day-ahead*, *real-time* e como serviço ancilar, no entanto, necessitam de estudos de viabilidade. Uma das dificuldades da utilização de baterias para esse intuito está relacionada ao alto custo. No entanto, o mercado mundial e nacional de veículos elétricos vem crescendo a cada ano, sendo o descarte das baterias utilizadas nesses ainda um tópico em aberto – já que para tais aplicações, baterias de íon-lítio são aposentadas ao atingir 70% a 80% da sua vida útil. Este trabalho estuda o uso em segunda vida destas baterias em sistemas residenciais de prossumidores fotovoltaicos, realizando uma análise de viabilidade de investimento considerando as mudanças previstas no modelo tarifário de compensação. A metodologia utiliza otimização via programação linear para minimizar os custos operacionais diários do prossumidor, considerando despacho otimizado da eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico para atendimento adequado da carga residencial, além do cálculo dos efeitos da degradação referente ao calendário e da degradação referente ao número de ciclos realizados pela bateria durante seu período operacional. O estudo mostra a tendência de viabilidade da implantação de baterias de segunda vida para tal finalidade – chegando em casos de retorno de investimento de mais de 500%, além de trazer exemplos de aplicações encontradas na literatura – como outras utilizações residenciais, comerciais, industriais e serviços da rede.

Palavras-chave: Baterias de Segunda Vida. Sistemas de compensação. Prossumidores

ABSTRACT

Batteries and energy storage systems, in general, have been increasingly widespread and researched technologies. Their characteristics include aspects related to composition, size, storage capabilities, and installed power, which are determined and dimensioned according to the chosen application. The insertion of this technology into the electrical grid generates impacts and changes not only in the interconnected system but also in the energy markets. Energy from storage systems can be sold in multiple markets: day-ahead, real-time and ancillary market; though, some feasibility studies are necessary. One of the difficulties in using batteries for this purpose is related to the high cost. However, the global and national market for electric vehicles has been growing every year, with the disposal of batteries used in these still being an open topic – since for such applications, lithium-ion batteries are retired when they reach 70% - 80% of their lifespan. This work evaluates the second-life use of these batteries in residential photovoltaic prosumer systems, carrying out an investment forecast analysis considering the changes foreseen in the supervisory tariff model. The uses methodology via linear programming to minimize the prosumer's daily operating costs, considering optimized dispatch of the electricity produced by the photovoltaic system to adequately meet the residential load, in addition to calculating the effects of manipulation regarding the calendar and manipulation regarding the number of cycles performed by the battery during its operational period. The study shows the viability trend of implementing second-life batteries for this purpose – reaching cases with a return on investment of more than 500%, in addition to bringing examples of applications found in the literature – such as other residential, commercial, industrial and network services.

Keywords: Second-life batteries. Net metering. Prosumers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparativo entre implementação de renováveis e não renováveis.	15
Figura 2 - Ciclo de vida de baterias reutilizadas em sistemas elétricos.	17
Figura 3 - Participação de renováveis e baterias em mercados de energia.	27
Figura 4 - Exemplos de aplicações das baterias de segunda vida.	29
Figura 5- Principais parâmetros ao se analisar uma bateria de segunda vida.	31
Figura 6 - Relação entre o número de ciclos e DoD.	46
Figura 7 - Fluxograma do Modelo Proposto.	47
Figura 8 - Participação na Formação da Tarifa de Energia e Proporção de TUSD e TE.	48
Figura 9 - Modelo Tarifário de Compensação.	48
Figura 10 - Classificação dos grupos de GD pela nova legislação.	49
Figura 11 - Perfil de geração do prossumidor.	54
Figura 12 – Perfil de consumo do prossumidor.	54
Figura 13 - SOC diário.	57
Figura 14 - Degradação da capacidade da bateria.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de aplicações de acordo com setor socioeconômico.	19
Tabela 2 - Projetos que tratam sobre baterias de segunda vida.	30
Tabela 3 - Parâmetros abordados pelos artigo.	32
Tabela 4 - Comparativo entre a REN482 e a Lei 14.300.	43
Tabela 5 - Dados da bateria de segunda vida.	52
Tabela 6 - Modelo Tarifário Considerado (ANEEL (2023)).	53
Tabela 7 - Resultado da simulação considerando a ausência de Net Metering.	55
Tabela 8 - Resultado da simulação considerando a presença do Net Metering.	56
Tabela 9 - Resultado da simulação considerando categoria GDIII da Lei 14.300.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IRENA	International Renewable Energy Agency
BEV	Battery Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
EUA	Estados Unidos da América
SOC	Estado de Carga
DoD	Profundidade de Carga
FV	Fotovoltaico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
EV	Veículo elétrico
TE	Tarifa de energia
TUSD	Tarifa de uso do sistema de distribuição
GD	Geração distribuída
SCEE	Sistema de compensação de energia elétrica
BSV	Bateria de segunda vida
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico

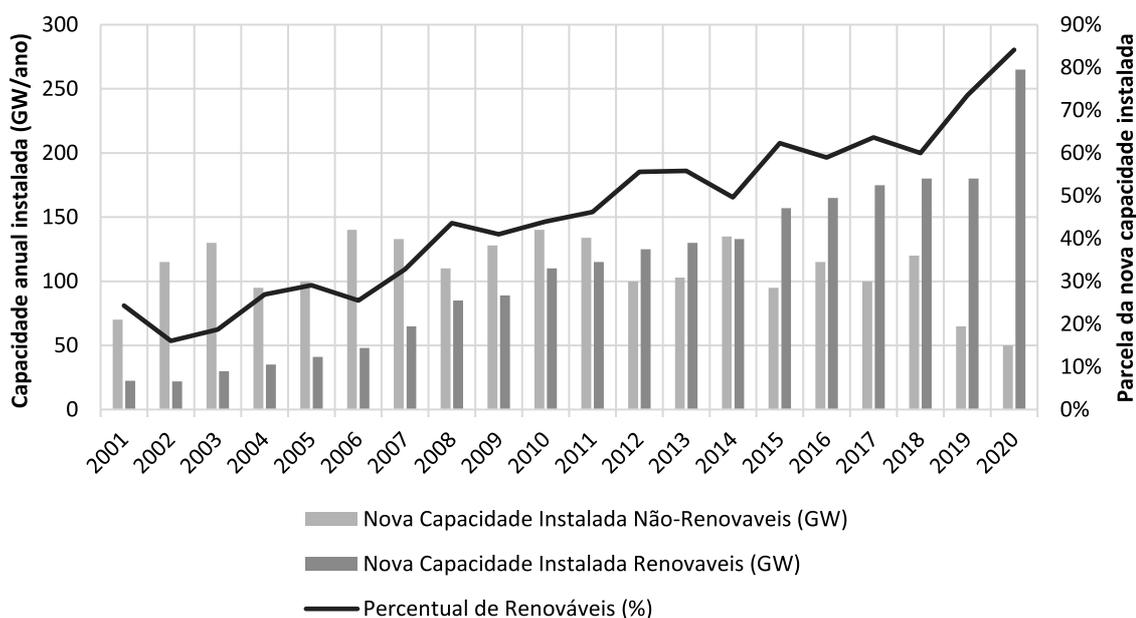
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	APLICAÇÕES PARA BATERIAS DE SEGUNDA VIDA.....	19
2.2	VISÃO GERAL DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA.....	21
2.2.1	BATERIAS E MERCADOS ANCILARES.....	22
2.2.2	BATERIAS E FONTES RENOVÁVEIS.....	25
2.3	BATERIAS DE SEGUNDA VIDA.....	27
2.3.1	VIDA ÚTIL.....	32
2.3.2	CUSTO.....	34
2.3.3	PROFUNDIDADE DE DESCARGA.....	35
2.3.4	DEGRADAÇÃO DA BATERIA DE SEGUNDA VIDA.....	35
2.3.8	RENDIMENTO NA CARGA E DESCARGA.....	36
2.4	BATERIA E FACILITADORES.....	37
2.5	EVOLUÇÃO DO MERCADO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E BATERIAS DE SEGUNDA VIDA.....	39
3	ANÁLISE ECONÔMICA PARA INCLUSÃO DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA PARA PROSSUMIDORES NO BRASIL	41
4	METODOLOGIA PROPOSTA	44
4.1	MODELAGEM DO PROBLEMA.....	44
4.2	MODELO DE DEGRADAÇÃO DA BATERIA DE SEGUNDA VIDA.....	46
4.3	REGULAMENTAÇÃO.....	47
4.4	LEI Nº 14.300/2022 - MARCO LEGAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	49
5	ESTUDO DE CASO	51
5.1	CENÁRIOS CONSIDERADOS.....	51
5.2	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	52
6	RESULTADOS	55
6.1	DISCUSSÃO.....	58
7	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A utilização de energias renováveis vem crescendo consideravelmente na última década. De acordo com IRENA (2021), o percentual anual de implementação de energias renováveis cresceu de aproximadamente 25% em 2001 para mais de 80% em 2020, conforme apresentado na Figura 1. Tamanha diversificação da matriz energética traz a necessidade de soluções que equilibrem a intermitência relacionada às fontes de geração renovável. Da mesma forma, a utilização de sistemas de armazenamento de energia conectados à rede elétrica vem crescendo significativamente e tem sido foco de diversos estudos, especialmente no que diz respeito à sua viabilidade econômica, por ser uma possível solução para a intermitência das fontes renováveis.

Figura 1 - Comparativo entre implementação de renováveis e não renováveis.



Fonte: Adaptado de IRENA (2021).

A variabilidade da produção de energia leva a uma maior necessidade de serviços como confiabilidade, regulação e congestionamento da transmissão. A fim de tornar a rede elétrica confiável e eficiente, os operadores do sistema devem implantar maneiras econômicas para equilibrar a oferta e a demanda em tempo real.

Além disso, nas últimas décadas, é possível notar a preocupação dos países em todo o mundo pela diminuição da emissão de gás carbônico (CO₂) na atmosfera e, com isso, o incentivo de inserção de fontes renováveis nas matrizes energéticas globais e a preocupação na disseminação de veículos elétricos.

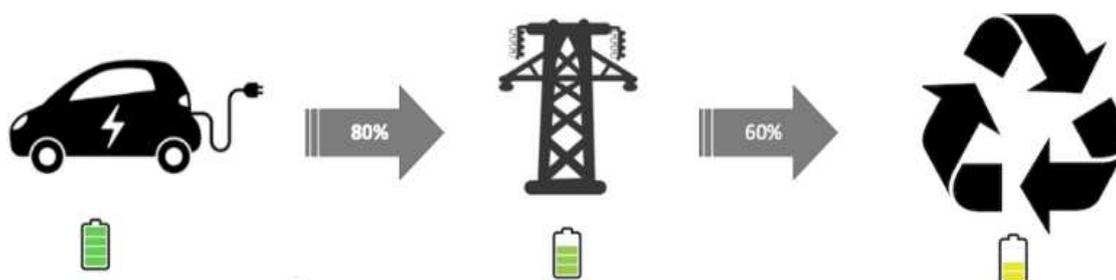
As estatísticas publicadas pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), mostram que a energia renovável continua a crescer a níveis recorde, apesar das incertezas globais, confirmando a tendência descendente da produção de energia a partir de combustíveis fósseis. Embora a energia hidroelétrica tenha representado a maior quota da capacidade global de geração de energia renovável com 1250 GW, as energias solar e eólica continuaram a dominar a nova capacidade de geração. Juntas, ambas as tecnologias contribuíram com 90 % para a quota de toda a nova capacidade renovável em 2022. A capacidade solar liderou com 22% de aumento, seguida da energia eólica, que aumentou a sua capacidade de geração em 9% (IRENA, 2023).

De acordo com IRLE (2023), as vendas globais de veículos elétricos apresentam mercado sólido. Um total de 10,5 milhões de novos veículos elétricos a bateria (do inglês *Battery Electric Vehicle* – BEV) e veículos híbridos plugáveis (do inglês *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* – PHEV) foram vendidos em 2022, um aumento de 55% em comparação com 2021. As vendas de veículos elétricos nos EUA e no Canadá aumentaram 48% em relação ao ano anterior, apesar de um mercado geral limitado de veículos leves, que caiu 8% durante 2022, comparado ao ano anterior. A rápida adoção dos veículos elétricos em mercados automotivos em decadência impulsionou ainda mais o valor de suas ações. BEVs (9,5%) e PHEVs (3,5%) representaram 13% das vendas globais de veículos leves em 2022, em comparação com 8,3% em 2021. Para todo o ano de 2023, espera-se a venda de 14,3 milhões de veículos elétricos, um crescimento de 36% em relação a 2022, com os BEVs atingindo 11 milhões de unidades e os PHEVs 3,3 milhões de unidades. Até o final de 2023 espera-se 40 milhões de veículos elétricos em operação, contando veículos leves, 73% são BEVs e 27% PHEVs.

Discussões recentes, como em BERZI *et al.*(2020) e XU *et al.*(2021), tratam sobre baterias que são aposentadas ao atingir 80% de sua vida útil em veículos elétricos e a possibilidade de uma aplicação de segunda vida em bancos de armazenamento de energia (entre outras), onde são reutilizados até atingirem 60% de sua vida útil, assim como evidenciado na Figura 2. Com a segunda aplicação, o custo de investimento inicial para sistemas de armazenamento de energia pode apresentar

uma considerável queda, aumentando a viabilidade desses bancos de bateria e ajudando a aumentar inserção de fontes renováveis à rede. Porém, para essa segunda aplicação ser segura, bem dimensionada, controlada e otimizada, é necessário que parâmetros importantes das baterias sejam medidos, dentre eles, a vida útil da bateria, o custo, a profundidade de descarga, a deterioração da capacidade e o rendimento na carga\descarga.

Figura 2 - Ciclo de vida de baterias reutilizadas em sistemas elétricos.



Fonte: (Elaboração Própria).

A flexibilidade operacional das baterias, também chamada de sistemas de armazenamento, caracterizada por um tempo de resposta rápido, alta taxa de rampa e capacidade de fornecer regulação de frequência, são recursos adequados para fornecer serviços nos mercados de eletricidade (PADMANABHAN; AHMED; BHATTACHARYA, 2020).

De acordo com PADMANABHAN; AHMED; BHATTACHARYA (2020), os seguintes aspectos devem ser levados em consideração no desenvolvimento da função de custo operacional de um sistema de armazenamento de energia em baterias:

- Características variáveis de degradação da bateria e dependentes do uso no modelo de custo operacional;
- Formulação mais realista das funções de custo operacional e lances / ofertas em termos de sua capacidade de energia ou SOC, ao invés de quantidades de energia.

Este trabalho apresenta uma pesquisa sobre o estado atual do uso de baterias retiradas de veículos elétricos, bem como seus parâmetros mais importantes a serem considerados para aplicações de segunda vida. Além disso, fornece uma descrição

detalhada das aplicações mais comuns para reutilização de baterias e seus modelos de negócios, identificando barreiras e facilitadores para sua propagação.

As principais contribuições do trabalho são:

- 1) Análise econômica de viabilidade da utilização de baterias de segunda vida por prossumidores no contexto brasileiro de energia elétrica, levando em consideração as mudanças tarifárias previstas;
- 2) Utilização de sistemas de tarifa branca e convencional específicos do Brasil no gerenciamento do fluxo de energia para uma residência juntamente com uma modelagem que considera valores atualizados de uma bateria com 70% de sua vida útil e sua respectiva degradação.

O segundo capítulo do estudo traz uma revisão bibliográfica sobre utilização de baterias de segunda vida, dividindo-as por tipo de aplicação, bem como as maiores contribuições dos artigos analisados. O capítulo 3 traz os aspectos técnicos a serem avaliados ao considerar a utilização de baterias de segunda vida, além de facilitadores, maiores aplicabilidades, avaliação do mercado brasileiro para sua utilização e a evolução do mercado de veículos elétricos – que viabiliza a oferta destas. No capítulo 4 são apresentadas a metodologia utilizada para o gerenciamento da bateria no sistema em questão, a metodologia de cálculo de degradação da bateria de segunda vida e os aspectos legais para o cálculo de compensação. O quinto capítulo traz o estudo de caso e parâmetros de simulação; os resultados são apresentados e discutidos no capítulo 6. O capítulo 7 finaliza o estudo com as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. APLICAÇÕES PARA BATERIAS DE SEGUNDA VIDA

Este capítulo busca por aplicações e tendência da viabilidade de operação e investimento de baterias de segunda vida, principalmente devido ao crescimento do mercado de veículos elétricos e à necessidade de unir o descarte/reciclagem consciente de baterias a oportunidades alternativas de lucros e negócios. Grande parte da pesquisa realizada encontra aplicações para setores residências ou serviços de rede. Na Tabela 1, são apresentados alguns trabalhos encontrados durante a pesquisa, classificando sua aplicabilidade e evidenciando suas contribuições e conclusões. Não foi encontrada na literatura grande quantidade de trabalhos que dissertam de utilizações específicas de baterias de segunda vida.

Ao se tratar de aplicabilidade de baterias de segunda vida, nota-se que a maior parte dos modelos de negócios estão relacionados a aplicações residenciais, enquanto a aplicação industrial apresenta uma defasagem de modelos de negócios. Há também grande número de pesquisas na área relacionadas a aplicação em serviços ancilares.

Assim, a utilização de baterias de segunda vida para sistemas de armazenamento de energia tem se tornado uma opção cada vez mais viável e de interesse para os diversos atores envolvidos nessa cadeia produtiva.

Tabela 1 - Tipos de aplicações de acordo com setor socioeconômico.

Tipo	Título	Aplicação	Conclusão/ Contribuição	Referência
Residencial	Second Life Battery Energy Storage System for Residential Demand Response Service	(1) Integração de energia renovável fotovoltaica e o uso de bateria de segunda vida em edifícios residenciais. (2) Minimização da conta de eletricidade para o usuário final e custo de investimento.	*Otimização do tamanho do sistema de armazenamento de segunda vida. *Definição do tamanho da instalação fotovoltaica ideal para a aplicação residencial. *Redução no custo geral do sistema.	(SAEZ-DE-IBARRA <i>et al.</i> , 2015)

Tipo	Título	Aplicação	Conclusão/ Contribuição	Referência
	An Economic and Environmental Assessment of Residential Rooftop Photovoltaics with Second Life Batteries in the US	(1) Avaliação do desempenho econômico e ambiental de sistemas fotovoltaicos em telhados residenciais com baterias de segunda vida. (2) Redução de custo e potencial de aquecimento global de sistemas fotovoltaicos em telhados residenciais nos EUA.	*Redução do custo da eletricidade fotovoltaica quando o excesso de eletricidade não foi vendido de volta para a rede. *Potencial de aquecimento global da energia fotovoltaica reduzido usando baterias de segunda vida.	(KAMATH; SHUKLA; ANCTIL, 2019)
Comercial	Modeling and Analysis of a Hybrid PV/Second-Life Battery Topology Based Fast DC-Charging Systems for Electric Vehicles	(1) Sistema de bateria híbrido usado como sistema de carregamento CC rápido para veículos elétricos e veículos elétricos híbridos plug-in. (2) Sistema de armazenamento de energia para redes de bonde urbano.	*Estabilidade da tensão da rede de bondes. *Carregamento CC eficiente e rápido para veículos elétricos e híbridos elétricos plug-in em diferentes modos de operação (indutivo e capacitivo). *Redução do custo total de infraestruturas de carregamento rápido, resultando em alta escalabilidade.	(HEGAZY <i>et al.</i> , 2015)
	A Cost-Effective Standalone E-bike Charging Station Powered by Hybrid Wind and Solar Power System Including Second-Life BESS	(1) Estação de carregamento de bicicletas elétricas autônoma e econômica, onde a energia é fornecida por painéis fotovoltaicos e pequenas turbinas eólicas conectados a baterias de segunda vida.	*Bicicletas elétricas, com zero emissão de carbono, recarregadas por uma estação onde o fornecimento de energia é totalmente proveniente de fontes de energia renováveis e baterias recicladas.	(NGUYEN <i>et al.</i> , 2020)
Industrial	A model for system integration of second life battery, renewable energy generation and mobile network station	(1) Integração de bateria de segunda vida, um gerador fotovoltaico e uma estação de telecomunicações de rede móvel conectada à rede	*Processamento de energia sistema de base de rádio e comunicação com diferentes fontes, como banco de dados de estimativa de impacto ambiental, comunicação de rede. *Modelo de consumo de energia, desempenho de armazenamento de energia e modelo de envelhecimento.	(BERZI <i>et al.</i> , 2020)

Tipo	Título	Aplicação	Conclusão/ Contribuição	Referência
Serviços da Rede	Economy analysis of second-life battery in wind power systems considering battery degradation in dynamic processes: Real case scenarios battery degradation in dynamic processes: Real case scenarios.	(1) Carga e descarga da bateria quando a energia eólica está abaixo ou acima da produção.	*Caso o preço da energia eólica diminua 1\$/MWh, o uso de baterias de segunda vida se torna benéfico para o sistema estudado.	(SONG <i>et al.</i> , 2019)
	Study on the economic benefits of retired electric vehicle batteries participating in the electricity markets	(1) Mercado regulamentar (bateria carrega ou descarrega para oferecer serviços para a regulação de mercado)	*Não obteve um bom custo-benefício para o Caso 1 (cenário pode mudar com diminuição de 10% do custo de investimento) nem para o Caso 2 (cenário muda com redução de 70% do custo de investimento)	(XU <i>et al.</i> , 2021)

Fonte: (Elaboração Própria).

2.2. VISÃO GERAL DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA

A energia proveniente dos sistemas de armazenamento pode ser comercializada em múltiplos mercados: *day-ahead*, *real-time* e mercado ancilar. No entanto, são necessários estudos de viabilidade. A operação *day-ahead* visa maximizar a diferença dos valores financeiros entre a energia vendida aos consumidores e as compras realizadas no mercado de eletricidade atacadista e da geração distribuída, ou seja, os lucros. No estágio *real-time* busca-se a minimização dos ajustes necessários para acomodar os desvios das quantidades previstas no planejamento *day-ahead* (CERBANTES, 2017). O mercado ancilar consiste na comercialização dos serviços ancilares, que são essenciais para o funcionamento do sistema elétrico e compreendem os controles primário e secundário de frequência das unidades geradoras, e suas respectivas reservas de potência, a reserva de prontidão, o suporte de reativos e o sistema especial de proteção.

Em HESSE *et al.* (2017) é apresentada uma visão geral esquemática da integração dos sistemas de armazenamento de energia utilizando baterias de íon-lítio

em diferentes níveis de rede, atendendo a uma série de tarefas de aplicação em redes de energia modernas.

Tais usos são relativamente recentes e ainda há um campo abrangente de pesquisa a ser descoberto. Nos EUA, por exemplo, somente em 2018 a *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) emitiu ordem oficial exigindo que Operadores de Sistema Independentes facilitem a participação de sistemas de armazenamento de energia em mercados de energia, reserva e serviços ancilares, incluindo seus parâmetros de licitação, representam os aspectos físicos e características operacionais tradicionais.

A fim de tornar a rede elétrica confiável e eficiente, os operadores do sistema devem implantar maneiras econômicas de equilibrar a oferta e a demanda em tempo real. O armazenamento de energia é considerado uma solução tecnicamente viável e pode mitigar diversos problemas. No entanto, a viabilidade econômica da solução ainda está em estudo, visto que não está claro se o armazenamento de energia irá gerar lucro suficiente ao interagir com a energia e os mercados ancilares (BERRADA; LOUDIYI; ZORKANI, 2016).

Na literatura, são apresentados os cenários comuns para aplicações de baterias no sistema como redução das flutuações de saída de energia, ajuste da saída no lado da geração de energia renovável, ajuste da frequência da rede elétrica, otimização do fluxo de energia no lado da transmissão e sistema de armazenamento de energia como fonte de energia distribuída no lado da distribuição (LI, XIANGJUN; WANG, 2019).

2.2.1. BATERIAS E MERCADOS ANCILARES

Em um mercado de eletricidade desregulamentado, são prestados dois tipos de serviços: serviço de energia e serviço ancilar. A companhia de energia paga aos geradores pela quantidade de eletricidade que fornecem, desde que esta seja de fato consumida. Por outro lado, os serviços ancilares oferecem dois tipos de pagamentos: pagamentos de reserva e de energia, de modo que a capacidade reservada para o serviço ancilar é paga independentemente da energia fornecida para o serviço ou não (CHO; KLEIT, 2015). Atualmente, os serviços ancilares frequentemente considerados são: o controle primário e secundário de frequência, e suas reservas associadas, a reserva de potência *Black Start* (que descreve o arranque de uma central elétrica após

uma falha principal da rede (LUND *et al.*, 2015)), a reserva de potência de prontidão e o suporte de reativos.

As tecnologias de armazenamento de energia são caracterizadas por seu armazenamento e capacidades de potência. Uma maior capacidade de armazenamento permite que o mesmo responda a situações de desbalanceamento de energia mais longas, enquanto uma maior capacidade de potência permite responder a desbalanceamentos de maior magnitude (LUND *et al.*, 2015).

Em se tratando de baterias em mercados de energia, seu uso mais comumente encontrado no mercado de serviços ancilares está no controle de frequência do sistema, na medida em que permite a regulação do balanço de potência em todos os momentos. O armazenamento em bateria é uma tecnologia ideal para regulação de frequência devido ao seu tempo de resposta quase instantâneo.

Para manter a frequência da corrente alternada da rede dentro dos limites permitidos, é necessário haver um equilíbrio entre a demanda e a oferta de energia a cada instante. Isso pode ser feito em escalas de tempo diferentes, ajustando a geração de energia, usando resposta à demanda ou armazenamento de eletricidade. A reserva de controle primário estabiliza a frequência do sistema no intervalo de tempo de segundos, seguida pela reserva de controle secundária (período de segundos até tipicamente 15 minutos após um desvio) e reserva de controle terciária (para incidentes maiores ou intervalos de tempo mais longos). A resposta rápida de muitas tecnologias de bateria as torna bastante adequadas para a regulação de frequência (MALHOTRA *et al.*, 2016).

Os mercados spot existentes para serviços ancilares se referem principalmente a serviços de controle de frequência e carga (comumente denotados por reservas). As reservas costumam ser classificadas de acordo com suas características técnicas: tempo de resposta em que devem ser prestadas, mecanismos de controle que regem sua coordenação e tipo de evento a que devem responder. Em primeiro lugar, os serviços de resposta mais rápida são classificados como de qualidade superior e também podem ser oferecidos como mais lentos. Em segundo lugar, as reservas podem ser controladas automaticamente ou atribuídas manualmente (GONZÁLEZ *et al.*, 2014).

Grande parte dos sistemas do armazenamento de energia tem sido consideradas historicamente não lucrativas para instalação, exceto para armazenamento hidrelétrico bombeado. Metodologias para identificar com precisão

os benefícios dos sistemas de armazenamento são necessários para determinar a provável implantação dessas tecnologias (BERRADA; LOUDIYI; ZORKANI, 2016).

BERRADA; LOUDIYI; ZORKANI (2016) desenvolveram um modelo de co-otimização que busca retornar o investimento de sistemas de armazenando operando simultaneamente em múltiplos mercados que incluem *day-ahead*, *real-time* e mercado ancilar (focado na regulação). O objetivo é quantificar o lucro gerado a partir das aplicações mais comuns de armazenamento, tomando o sistema de armazenamento como *price taker* (participante que não tem força para fixar e/ou deslocar preços no mercado), e potencial fonte múltipla de receita, oriunda dos 3 mercados citados anteriormente. Nesta análise, o armazenamento de energia pode carregar / descarregar energia em mercados em *real-time* ou *day-ahead*, ou vender capacidade no mercado ancilar. No entanto, o artigo em questão emprega o uso de sistemas *gravity-storage*¹, onde sua operação pode ser considerada semelhante à de baterias estacionárias. Embora o armazenamento de energia seja tecnicamente capaz de gerar altas receitas com a participação em alguns serviços, a tecnologia deve ser combinada com outras aplicações para se tornar lucrativa e justificar economicamente sua implantação. Nesse caso, o custo anual excedeu os benefícios anuais de armazenamento da participação nas três aplicações apresentados (BERRADA; LOUDIYI; ZORKANI, 2016).

Em PADMANABHAN; AHMED; BHATTACHARYA (2020) é proposto um novo modelo de custo operacional de baterias de íon-lítio considerando o custo de degradação, com base na profundidade de descarga e taxa de descarga. É formulada uma estrutura de *bid/offer* detalhada com base nas funções de custo operacional propostas do sistema de armazenamento. Posteriormente, é desenvolvido um modelo matemático considerando a inclusão de baterias em mercados de energia visando otimizar o LMP (*local marginal price*). A bateria, no caso, de propriedade independente, interage com os mercados de energia e reserva de três maneiras (i) comprar energia durante a operação de carregamento, (ii) vender energia durante a operação de descarga e (iii) fornecer capacidade em mercado de reserva girante durante as operações de carga ou descarga. A grande vantagem da metodologia proposta é capturar mais precisamente o custo real da operação do sistema de

¹ Gravity-storage: tecnologia para armazenar eletricidade como energia potencial de pesos sólidos levantados contra a gravidade da Terra.

armazenamento, contabilizando sua degradação, proporcionando assim decisões de compensação de mercado realistas.

Em CHENG *and* POWELL (2018), é proposta uma co-otimização de sistemas de energia visando a arbitragem de energia e regulação de frequência, o que exige da bateria tomada de decisões relacionadas a carga e descarga em diferentes escalas de tempo, enquanto contabiliza as informações estocásticas, como demanda de carga, preços de eletricidade e sinais de regulação. Para tal, é utilizada abordagem de programação dinâmica em várias escalas, resolvendo subproblemas menores com espaços de estados reduzidos, em diferentes escalas de tempo.

2.2.2. BATERIAS E FONTES RENOVÁVEIS

No que se refere a fontes renováveis, sabe-se que sua inclusão à rede pode ser acompanhada por problemas relacionados ao aspecto intermitente de sua geração, ocasionando variações de frequência e tensão na rede elétrica. Uma possível solução está na inclusão de sistemas de armazenamento de energia, baseados, por exemplo, em baterias de segunda vida (Neubauer *et al.*, 2015).

Na literatura, diversos projetos abordam a viabilidade do uso de baterias de segunda vida. O *Sunbatt Project* (CASALS; AMANTE GARCÍA; CANAL, 2019), por exemplo, realizou o estudo de tais equipamentos visando um produto final que fosse um sistema de armazenamento de energia viável para o consumidor e, com isso, analisa sua utilização para quatro estudos de casos distintos. Já o projeto realizado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) visou analisar os maiores obstáculos relacionados a essas baterias de segunda vida para uma nova aplicação, avaliando a qualidade com que atingem o final de sua primeira vida, os requisitos para o seu condicionamento, o tempo de vida delas para uma segunda aplicação e seu valor (Neubauer *et al.*, 2015). Em Mathews *et al.* (2020). Foram analisadas estratégias que possam prolongar a vida útil da bateria por meio de simulações como exemplo, visando limitar a profundidade de descarga da mesma.

A recente redução de custos e avanços tecnológicos em sistemas de baterias de média a grande escala tornam esses dispositivos uma alternativa para produtores eólicos que operam nos mercados de eletricidade. Associar um parque de energia eólica a um sistema de armazenamento (ou usina de energia virtual - VPP) fornece às concessionárias uma ferramenta que converte a produção incerta de energia eólica

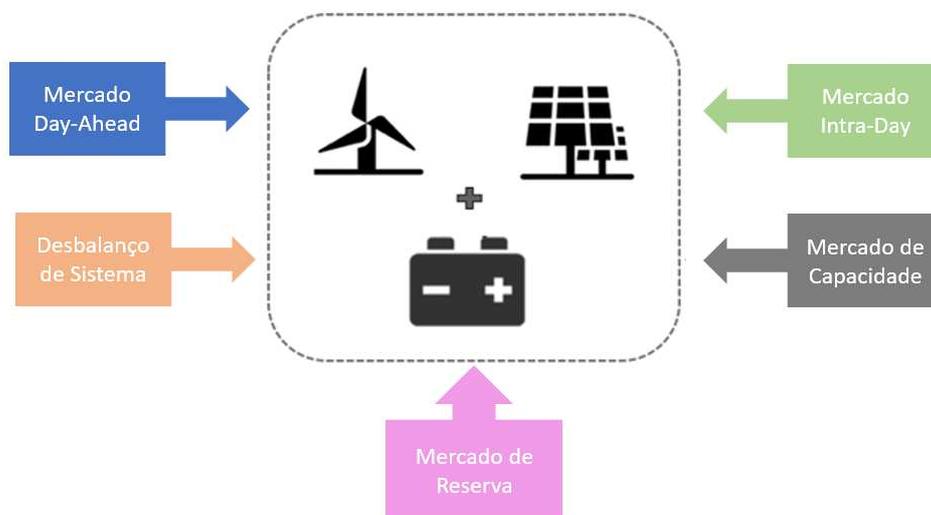
em uma tecnologia despachável, que pode operar não apenas em mercados spot e de ajuste (*day-ahead e intraday*), mas também nos mercados de serviços ancilares. Além disso, estudos recentes demonstraram que o investimento de custo de capital na bateria pode ser recuperado apenas por meio de uma VPP participando nos mercados de serviços ancilares (HEREDIA; CUADRADO; CORCHERO, 2018).

O mesmo pode ser aplicado também a geradores fotovoltaicos. A característica elétrica não linear das células fotovoltaicas e a intermitência da radiação solar requerem a integração do sistema de armazenamento de energia intermediário para fornecer eletricidade estável às cargas (JING *et al.*, 2018). Essa solução permite que uma parte do excedente de eletricidade seja armazenada ao invés de injetada diretamente na rede de distribuição, mitigando assim seu estresse operacional e permitindo uma participação mais eficiente e lucrativa nas negociações de compra e venda de energia elétrica no mercado livre.

Sendo assim, a associação de fontes renováveis a sistemas de armazenamento de energia permite uma maior e mais ativa participação desses produtores em mercados de eletricidade, conforme esquematizado na Figura 3.

O estudo realizado em Deotti *et al.* (2020) visa avaliar a viabilidade do investimento em baterias estacionárias novas para o consumidor considerando seis possíveis futuros cenários propostos pela Consulta Pública ANEEL n.º 25/2019 e, em quase todos os cenários – exceto o caso base, o VPL obtido foi negativo devido ao alto custo de investimento dessas baterias. Levando em consideração os investimentos informados pelos autores e dados atuais, os resultados encontrados ainda se mantêm válidos para a atualidade.

Figura 3 - Participação de renováveis e baterias em mercados de energia.



Fonte: (Elaboração Própria).

Na última década, devido à procura por tecnologias de emissão zero no setor do transporte, a tecnologia das baterias tem se aprimorado rapidamente, levando a uma conseqüente queda do custo de produção (BloombergNEF, 2020). Em 2010 seus valores eram de 1.100\$/kWh (Henze, 2019). Em 2022, o preço médio estimado da bateria era cerca de 150\$/kWh (IEA, 2023). Entende-se que, ao diminuir o custo de uma bateria nova, haverá queda no custo da bateria de segunda vida, fortalecendo a viabilidade econômica de seu uso como sistemas de armazenamento de energia.

2.3. BATERIAS DE SEGUNDA VIDA

Baterias de segunda vida podem ser classificadas, de uma forma mais abrangente, em dois tipos: baterias que atingiram sua EoL ou *End Of Life* (80% da sua vida útil) ou veículos elétricos que foram aposentados e suas baterias, porém, ainda não atingiram a EoL (HOSSAIN et al., 2019). Já em LI, JUN; WANG; TAN (2017), a classificação de baterias e a seleção das que podem ser reutilizadas consiste em 3 etapas: a primeira é uma triagem pela aparência e testes básicos de desempenho, a segunda analisa a impedância e capacidade e a terceira estabelece o conceito de capacidade efetiva. Capacidade efetiva é a capacidade da bateria em determinada temperatura e taxa de descarga, que depende das condições de trabalho.

Baterias de segunda vida podem ser usadas em aplicações de armazenamento de energia devido aos menores requisitos de potência e energia quando comparadas com aplicações em veículos elétricos (JIANG *et al.*, 2018).

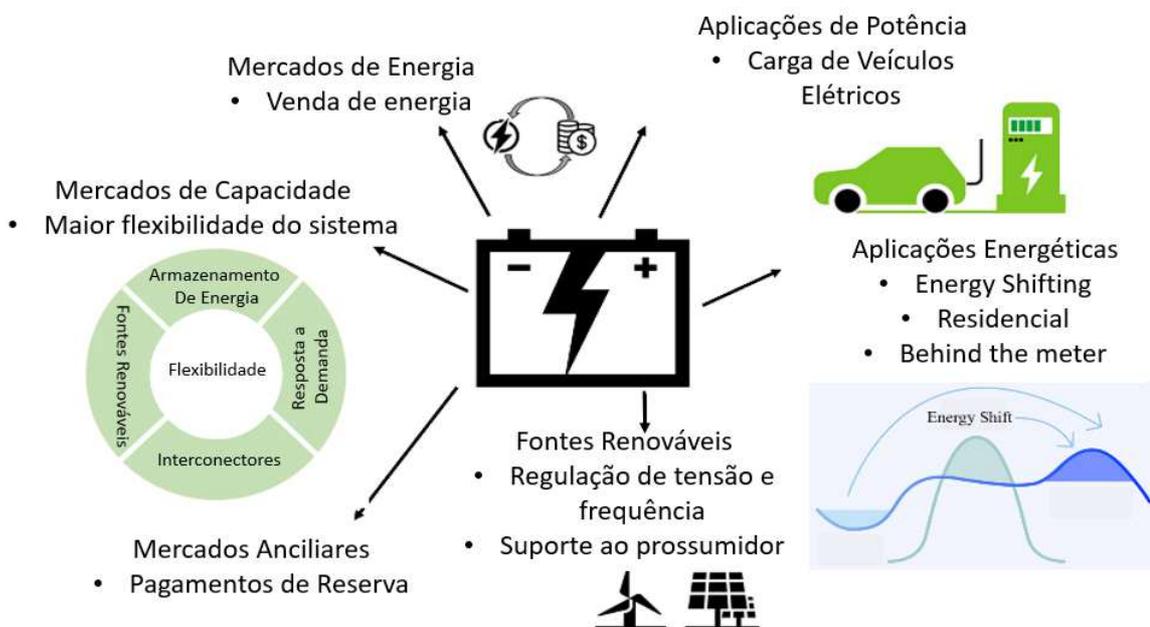
A Figura 4 evidencia algumas diferentes aplicações que podem ser oferecidas às baterias de segunda vida. Elas podem ser usadas tanto para o mercado de energia quanto para o mercado de capacidade, sendo que, neste último, as baterias são utilizadas diretamente como fornecedoras de energia, o que ajuda a aumentar a flexibilidade desse mercado (ANISIE *et al.*, 2019). Outra aplicação seria em sistemas de energia com fontes renováveis ou no mercado de serviço ancilares, como já discutido anteriormente (JING *et al.*, 2018; CHO; KLEIT, 2015). Elas podem ser utilizadas em aplicações com uso intensivo de potência (servindo para regulação de frequência ou suporte para carregamento de veículos elétricos) ou aplicações de uso intensivo de energia (como baterias antes do medidor (*behind-the-meter*) e uso residencial, alteração do pico de consumo de energia) (SALZA *et al.*, 2021).

Na literatura, são encontrados alguns exemplos de estudos e iniciativas visando comprovar a viabilidade da reutilização de baterias. O *Joint Research Center* realizou uma pesquisa durante os anos 2016 a 2017 visando avaliar a sustentabilidade da aplicação de baterias automotivas em aplicações para a segunda vida. Como conclusão, o uso de baterias de segunda vida é acompanhado por benefícios ambientais, sendo, porém, necessário mais estudos e pesquisas para incluir aplicações mais diversificadas e informações para analisar pelo ponto de vista econômico (PODIAS *et al.*, 2018). A *Autobedrijf Peter Ursem* é um exemplo de empresa automotiva que realiza o reaproveitamento de baterias passando pelos processos de coleta, testes e reaproveitamento (PODIAS *et al.*, 2018).

O Projeto *Europeu Batteries 2020* aborda o tema de utilização de baterias de segunda vida para sistemas de armazenamento de energia provenientes de veículos elétricos (SAEZ-DE-IBARRA *et al.*, 2016). O *Sunbatt Project* discutido em CASALS; AMANTE GARCÍA; CANAL (2019) visa avaliar o comportamento das baterias de segunda vida oferecendo serviços para quatro possíveis aplicações: apoio às cargas rápidas de veículos elétricos, consumo próprio, área de regulação ou na área de redundância de linhas de transmissão. Obteve-se que a vida útil da bateria pode variar de 30 a 6 anos dependendo da aplicação escolhida. A *Vattenfall* é uma concessionária de energia elétrica sueca que realizou uma parceria com a BMW para projetos-piloto

visando avaliar viabilidade de aplicações para baterias de segunda vida (PODIAS et al., 2018).

Figura 4 - Exemplos de aplicações das baterias de segunda vida.



Fonte: (Elaboração Própria).

A Hyundai Motors coleta baterias proveniente de acidentes e realiza o programa completo de remanufatura para aplicações residências com energia solar (PODIAS et al., 2018). Muitos outros projetos tratam sobre aplicações para baterias de segunda vida, podendo citar: Batteries2020¹, *Energy Local Storage Advanced System* – ELSA2, ABattReLife³, AlpStore⁴, Netfficient⁵, 2Bcycled⁶. A Tabela 2 traz alguns projetos realizados ou que ainda estão em execução que tiveram como tema a abordagem de baterias de segunda vida e sua utilização em novas aplicações.

Tabela 2 - Projetos que tratam sobre baterias de segunda vida.

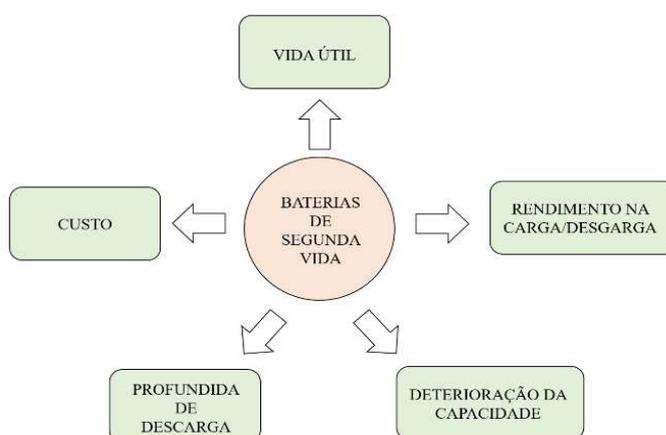
Iniciativa	Objetivo	Autorias-Parcerias	Ano	Ref
Nissan e EDF Energy	Explorar reciclagem de baterias de segunda vida provenientes do Nissan Leaf para sistemas de armazenamento comerciais por baterias. A energia seria armazenada nas baterias e injetada na rede pelo <i>PowerShift</i> da EDF Energy para reagir à demanda.	Nissan e EDF Energy	2018	(JOHNSON, 2018)
SolarBox Project	Visa criar produtos de armazenamento de energia de baixo custo com baterias de segunda vida proveniente de equipamentos eletrônicos.	Energy Futures Lab – Imperial College London	2019	(LAB, 2019)
Second Life Project	Baterias de segunda vida provenientes do Nissan Leaf são usadas para criar um sistema de armazenamento de energia estacionário. Esse sistema é integrado com a planta de energia convencional já existente para evitar cortes de carga, melhorar a confiabilidade da rede e garantir o contínuo fornecimento de energia.	Enel e Nissan	2019	(SALZA <i>et al.</i> , 2021)
SmartHubs Project	Planejamento para mais de 1.000 baterias de segunda vida de veículos Renault serem usadas em um sistema de energia local (E-STOR projetados pela <i>Connected Energy</i>) visando fornecimento a baixo custo para moradias, transporte e empresas locais.	Renault and Connected Energy	2020	(CHÉNOT, 2020)
Advanced Battery Storage (Douai – France)	O primeiro sistema de armazenamento avançado com baterias de segunda vida instalado na fábrica Renault Georges Besse com capacidade para armazenar 50 MWh em vários locais, podendo ser utilizados para regular e estabilizar a rede.	Renault e parceiros: Banque des Territoires, Nidec, The Mobility House, Demeter, and the Ecological Transport Modernization Fund	2020	(CHÉNOT, 2020)

Iniciativa	Objetivo	Autorias-Parcerias	Ano	Ref
Projeto da Start-Up Nunam	Utilizar baterias íon-lítio de segunda vida para criar um novo sistema de armazenamento de energia – <i>Nunam mobile power bank</i> . Ele pode fornecer energia para consumos menores, como smartphones ou lâmpadas.	Nunam e Audi Environmental Foundation	2020	(FOUDATI ON, 2020)
POCITYF Project - A Positive Energy City Transformation Framework	Criar Blocos Positivos de Energia (BPE) onde a produção energética renovável local será superior ao consumo energético – inclui o uso de baterias de segunda vida provenientes da empresa <i>Betteries</i>	Projeto cofinanciado pelo programa H2020 da União Europeia, liderado pela EDP Labelec.	2019 a 2024	(LABELEC, 2020)

Fonte: (Elaboração Própria).

Um desafio ao lidar com baterias de segunda vida é que, mesmo se forem consideradas baterias do mesmo tipo e em utilização em aplicações semelhantes, é necessário avaliar uma a uma, pois características inerentes a elas resultam em diferentes mecanismos de degradação. Assim, é necessário conseguir estimar suas características após essa primeira aplicação. As características consideradas vitais neste trabalho são: vida útil, custo, profundidade de descarga, deterioração da capacidade e rendimento na carga/descarga, sendo evidenciadas na Figura 5. A Tabela 3 evidencia os artigos utilizados para a pesquisa envolvendo cada um desses parâmetros. O modelo proposto neste trabalho leva em consideração todos os parâmetros abordados pela tabela.

Figura 5- Principais parâmetros ao se analisar uma bateria de segunda vida.



Fonte: (Elaboração Própria).

Tabela 3 - Parâmetros abordados pelos artigos.

Artigo	Vida útil	Custo	Profundidade de descarga	Deterioração da Capacidade	Rendimento carga e descarga
(AHMADI <i>et al.</i> , 2014)	-	-	-	x	-
(KEIL <i>et al.</i> , 2015)	-	-	x	-	-
(BERECIBAR <i>et al.</i> , 2016)	x	-	-	x	-
(ASSUNÇÃO; MOURA; DE ALMEIDA, 2016)	x	x	x	x	x
(WANG, TIAN SI <i>et al.</i> , 2016)	x	-	-	x	-
(SALLES <i>et al.</i> , 2017)	-	x	-	-	-
(PODIAS <i>et al.</i> , 2018)	x	-	-	-	-
(JIANG <i>et al.</i> , 2018)	x	-	-	-	-
(PODIAS <i>et al.</i> , 2018)	x	-	x	x	x
(QUINARD <i>et al.</i> , 2019)	x	-	-	-	-
(HOSSAIN <i>et al.</i> , 2019)	-	x	-	x	-
(CASALS; AMANTE GARCÍA; CANAL, 2019)	x	-	x	x	-
(MATHEWS <i>et al.</i> , 2020)	x	x	x	x	-
(JANOTA; KRÁLÍK; KNÁPEK, 2020)	x	x	-	x	-
(WANG, TAOXIANG <i>et al.</i> , 2020)	x	-	-	-	-

Fonte: (Elaboração Própria).

2.3.1. VIDA ÚTIL

A vida útil da segunda vida depende da intensidade de uso em primeira vida, desta forma os dados de envelhecimento da bateria da primeira vida seriam cruciais para selecionar as baterias mais adequadas e prever seu desempenho de envelhecimento em um uso potencial de segunda vida.

A qualidade e vida útil restantes de uma bateria, após sua primeira vida, dependem de uma série de fatores, incluindo especialmente: a composição química da bateria, o número de ciclos, a corrente de descarga, o Estado de Carga (do inglês *State-Of-Charge* – SOC), a Profundidade de Descarga (do inglês *Depth-Of-Discharge*

- DoD), a taxa de transferência de carga de um microciclo atual e a temperatura da célula. O número de ciclos e o DoD variam de acordo com a aplicação, e a degradação da bateria será influenciada por diferentes produtos químicos e as características de envelhecimento irão variar significativamente (STRICKLAND *et al.*, 2014).

Uma característica também a ser analisada para encontrar a vida útil da bateria é o *State-Of-Health* (SOH) ou Estado de Saúde da Bateria. O SOH é usado para analisar a vida útil da bateria, evidenciando a capacidade da bateria em entregar a performance desejada quando comparada com uma bateria nova (BERECIBAR *et al.*, 2016). Para sua estimativa, utilizam-se parâmetros que sejam afetados com o seu uso, por exemplo, sua impedância ou sua capacidade.

Em BERECIBAR *et al.* (2016) utiliza-se o método pela curva de tensão diferencial com taxa baixa e constante de carga ou descarga parcial (C\5) para a estimativa do SOH que pode ser utilizado até mesmo em aplicações reais. Em (QUINARD *et al.*, 2019) três métodos experimentais (análise da tensão constante durante o carregamento CC-CV, análise da capacidade incremental e contador ciclométrico parcial) são testados para obter o SOH das baterias, sendo que o último foi o mais preciso. Em MARTINEZ-LASERNA *et al.* (2018) são feitos estudos com intuito de avaliar os efeitos do SOH da bateria de íon-lítio, níquel, manganês, cobalto/carbono e o histórico de envelhecimento ao longo do desempenho da segunda vida em diferentes aplicações. Na literatura são discutidas formulações visando um modelo matemático de envelhecimento capaz de descrever a perda de capacidade da bateria levando em consideração os efeitos da temperatura de trabalho, carga/descarga e profundidade de descarga, adequado para estimar a vida útil da bateria, capacidade residual e margens de confiabilidade de acordo com os perfis de missão de segunda vida esperados (MICARI *et al.*, 2020).

2.3.2. CUSTO

A aplicação de baterias de segunda vida em outras áreas ainda é um tema em estudo e que ainda não foi criado um acordo com as montadoras de veículos a respeito da venda dessas baterias. Assim, ainda há especulações a respeito do custo de compra dessas baterias de segunda vida. Em MATHEWS *et al.* (2020) é calculado o preço em que as baterias poderiam ser adquiridas para que não se tenha prejuízo no caso estudado, variando de 60% do custo de baterias novas a 80% dependendo das premissas utilizadas para o funcionamento do sistema. Em JANOTA; KRÁLÍK; KNÁPEK (2020) constrói-se um modelo de ciclo de vida estendido para as baterias baseado na economia circular da Comissão Europeia que permite encontrar o custo estimado para as baterias de segunda vida, incluindo um valor estimado para o processo de recondicionamento, um coeficiente para o estado de vida útil da bateria e um coeficiente para a demanda de tais baterias. Já as pesquisas em WANG, TAOXIANG *et al.* (2020) e WANG, TAOXIANG; KANG; LIU (2019) abordam o tópico de uma forma diferente, criando uma metodologia que considera os custos das baterias dos veículos elétricos (baterias novas) e os custos da aplicação dessa bateria como segunda vida em sistemas de armazenamento de energia para determinar os pontos de fim de vida útil.

A partir do desenvolvimento de pesquisas e novas tecnologias, há uma tendência de queda de preço de baterias de segunda vida. Com o relatório do *National Renewable Energy Laboratory - NREL* (COLE, FRAZIER., 2019) é possível obter algumas estimativas para o custo de baterias para os próximos anos. Três estimativas foram feitas considerando cenários de acordo com a trajetória de menores reduções de custos (mais caros), medianas e maiores reduções (menores preços finais), obtendo reduções de 26%, 47% e 63%, respectivamente, para o ano de 2030. E reduções de 44%, 60% e 78% para o ano de 2050 respectivamente. Em termos de valores e considerando sistemas de 4h de baterias íon-lítio, obtêm-se projeções de custo de \$338/kWh, \$207/kWh e \$124/kWh para 2030 e, \$258/kWh, \$156/kWh e \$76/kWh para 2050 (COLE, FRAZIER., 2019). Considerando tais reduções para o custo de baterias novas, os custos para as baterias de segunda vida indicam uma tendência de queda ainda maior em relação às mencionadas anteriormente (COLE, FRAZIER., 2019).

2.3.3. PROFUNDIDADE DE DESCARGA

A profundidade de descarga da bateria ou *Depth-of-Discharge* (DoD) indica a porcentagem da bateria que foi descarregada em relação à sua capacidade total. A profundidade de descarga é definida como a capacidade de descarga de uma bateria totalmente carregada, dividida pela capacidade nominal da bateria e normalmente é expressa como uma porcentagem. Diferente do SOC, começa a partir de um estado de bateria totalmente carregada. O SOC representa o nível de carga de uma bateria elétrica em relação à sua capacidade e é normalmente utilizado ao tratar-se do estado atual de uma bateria em uso, enquanto o DoD é mais frequentemente visto ao discutir a vida útil da bateria após o uso repetido.

A estimativa precisa do SOC é uma das principais tarefas dos sistemas de gerenciamento de bateria, o que ajuda a melhorar o desempenho e a confiabilidade do sistema, além de prolongar a vida útil da bateria. Na verdade, a precisão na determinação do SOC da bateria pode evitar a interrupção imprevista do sistema e evitar que as baterias sejam carregadas ou descarregadas demais, o que pode causar danos permanentes à estrutura interna das baterias. No entanto, como a descarga e a carga da bateria envolvem processos químicos e físicos complexos, não é trivial estimar o SOC com precisão sob diferentes condições de operação (MURNANE; GHAZEL, 2017).

Sabe-se, porém, que altas variações de SOC impactam a deterioração da capacidade das baterias (HOSSAIN *et al.*, 2019). Em MATHEWS *et al.* (2020) consideram-se os limites de SOC de 65%-15%, 85%-20% e 95%-15%, sendo que no primeiro a vida útil da bateria alcança mais de 16 anos enquanto no segundo a vida útil diminui para 11 anos e no terceiro diminui para 8,4 anos. A pesquisa em JIANG *et al.* (2018) mostra que o intervalo de operação do SOC é o maior influenciador na taxa de deterioração da capacidade da bateria quando se aproxima do final de sua vida útil.

2.3.4. DEGRADAÇÃO DA BATERIA DE SEGUNDA VIDA

De maneira geral, de acordo com a literatura, existem dois aspectos essenciais que influenciam na vida útil de baterias: (i) seu envelhecimento, ou seja, o tempo decorrido após sua fabricação, e (ii) sua forma de utilização, que inclui fatores como

temperatura e química das células, corrente de descarga e, principalmente, a quantidade e intensidade de ciclos que realiza. Tratando-se de baterias de segunda vida, é ainda mais crucial ter uma estimativa confiável sobre sua vida útil para avaliar a viabilidade ou não desse investimento. A degradação devido ao tempo (calendário) é independente do número de ciclos, profundidade de descarga ou carregamento da bateria (JANOTA; KRÁLÍK; KNÁPEK, 2020). Consiste, porém, em uma função que relaciona o estado de carga (SOC), tempo e composição química do catodo (JANOTA; KRÁLÍK; KNÁPEK, 2020). Já a degradação em relação ao ciclo é uma função dependente do número de ciclos realizados e a sua profundidade de descarga média (JANOTA; KRÁLÍK; KNÁPEK, 2020). De acordo com WANG, TIANZI *et al.* (2016), é possível notar uma relação entre a capacidade de uma célula de bateria e a curva da tensão de circuito aberto e, utilizando o sistema de coordenadas simultâneas, os efeitos da deterioração da capacidade podem ser representados independentemente.

O método do *rainflow* é amplamente utilizado para análise de fadiga ou degradação, e baseia-se na contagem de ciclos de uma amostragem de dados que representa o comportamento específico de determinado equipamento. Cada ciclo de carga/descarga das baterias, dependendo da sua profundidade, causa um estresse específico, sendo a perda de vida útil da bateria o resultado do acúmulo de todos esses ciclos (Xu *et al.*, 2016).

Em Xu *et al.* (2016) é apresentado um modelo computacional para simular os efeitos da degradação do calendário e da degradação de ciclo de baterias de íon-lítio. O número de ciclos que uma bateria pode realizar ao longo de sua vida está relacionado com diferentes profundidades de descarga durante sua operação. Em JIANG *et al.* (2018) o método da análise de capacidade incremental (*incremental capacity analysis - ICA*) é realizado e as características das curvas IC são usadas para estimar a capacidade da bateria.

2.3.5. RENDIMENTO NA CARGA E DESCARGA

O rendimento na carga e descarga, também comumente chamado de eficiência de carga e descarga, está relacionado com a deterioração da capacidade da bateria, sendo esperado que o rendimento diminua com a capacidade (AHMADI *et al.*, 2014; PODIAS *et al.*, 2018).

O envelhecimento das baterias de veículos elétricos resulta não apenas no enfraquecimento da capacidade destas, mas também no enfraquecimento da eficiência de carga. Em HEYMANS *et al.* (2014) são citados testes laboratoriais que mostram eficiências realistas de pacotes de baterias em ordens de 85% a 95%, dependendo da temperatura e da taxa C^2 de carga ou descarga. Na literatura, são apresentados valores condizentes com os testes laboratoriais, como 95% (XU *et al.*, 2021), 91% (KAMATH *et al.*, 2020b) e variando de 87% a 95% (KAMATH *et al.*, 2020a). Para as mesmas baterias, em primeira vida são citados valores de eficiência na ordem de 95% (KAMATH *et al.*, 2020a; KAMATH *et al.*, 2020b).

Em baterias de íon-lítio, a redução na eficiência do ciclo de carga/descarga da bateria é basicamente causada pela formação de uma camada de eletrólito sólido na interface anodo eletrólito devido ao consumo dos íons-lítio e são justamente as camadas superficiais do ânodo e do cátodo que desempenham um papel de barreira nas reações com o eletrólito (AHMADI *et al.*, 2014).

2.4. BATERIAS E FACILITADORES

Tratando-se de segunda aplicação para baterias que já alcançaram o fim de sua primeira vida útil em veículos elétricos, alguns obstáculos são discutidos. Pode-se destacar:

- 1) Barreiras regulatórias no mundo – falta de normas de segurança e ambientais claras e efetivas (DESARNAUD, 2019; HOSSAIN *et al.*, 2019);
- 2) Barreiras técnicas – relacionada à complexidade e a falta de domínio/prática de procedimentos para o processo de seleção e recondicionamento de baterias de segunda vida (SALZA *et al.*, 2021) e, também, a falta de dados a respeito da utilização e desempenho da bateria de segunda vida em sua primeira aplicação (HOSSAIN *et al.*, 2019; SALZA *et al.*, 2021);

² A corrente de uma bateria também pode ser medida através da Taxa C (ou *C rate* em Inglês). A letra C indica a capacidade da bateria. Uma corrente de 1C indica uma corrente que é numericamente igual à capacidade da bateria, em Ampère hora [Ah].

- 3) Barreiras econômicas – incertezas a respeito do preço de compra da bateria de segunda vida (SALZA *et al.*, 2021), o risco da falta de fornecimento de tais baterias e cadeia de distribuição (HOSSAIN *et al.*, 2019); a necessidade de uma estrutura de mercado e modelo de negócio (HOSSAIN *et al.*, 2019).
- 4) Falta de padronização – ausência de uma regulação que padronize veículos elétricos, assim, cada um utiliza determinado tipo de bateria, dificultando sua interoperabilidade (SALZA *et al.*, 2021); falta de dados a respeito do projeto da bateria e seus produtos químicos constituintes (HOSSAIN *et al.*, 2019; SALZA *et al.*, 2021).

Apesar de todas essas dificuldades, há diversas razões que tornam investimentos em pesquisas e desenvolvimento para solução de tais obstáculos uma opção interessante para o mercado. A questão das baterias é relevante para muitas áreas políticas, desde transporte, ação climática e energia até resíduos e recursos. Baterias contêm uma grande variedade de materiais, como metais básicos, matérias-primas críticas e produtos químicos, que podem levantar problemas em termos de disponibilidade de recursos, toxicidade, segurança, produção e impactos de reciclagem ou descarte. Promovendo essa aplicação de segunda vida, há uma redução do desperdício, metais e minerais liberados no ambiente (HALLEUX, 2021). Há, também, o próprio interesse das empresas produtoras de veículos elétricos em promover novas aplicações para as baterias de segunda vida, tanto para aprimorar sua política ambiental amigável quanto para obter mais um produto em seu portfólio de venda, o que pode ser comprovado pelas diversas iniciativas de empresas e produtoras de automóveis discutidas na Tabela 2.

Para tornar o mercado de baterias de segunda vida viável e de grande porte, é necessário o desenvolvimento de normas técnicas e padronizações que abordem o processo de reaproveitamento e recondução das baterias e, até mesmo, envolvendo a padronização de veículos elétricos para permitir a interoperabilidade de diferentes origens (SALZA *et al.*, 2021). Também é importante que as empresas responsáveis por esse passo de avaliação da qualidade das baterias tenham acesso a sua utilização de primeira vida (SALZA *et al.*, 2021). O Projeto Melilla propôs a utilização de uma plataforma aberta que visava fornecer os dados de uso de uma bateria em sua primeira vida em colaboração com os fabricantes de automóveis para permitir o melhor entendimento a respeito das condições das mesmas (SALZA *et al.*, 2021).

Para que a aplicação de segunda vida se torne realmente uma possibilidade, é necessário um trabalho em conjunto entre as autoridades reguladoras, entre os stakeholders (como por exemplo, fabricantes de veículos elétricos ou possíveis indústrias de recondição de baterias) e os consumidores. De acordo com PODIAS *et al.* (2018), foram enviados questionários para membros chave na cadeia de produção de baterias a respeito de aplicações de segunda vida para baterias e indicaram um crescente interesse nesse tópico. Assim, essa parceria entre membros chave desse processo pode ser algo viável e desejável para todas as partes. Iniciativas por parte das autoridades reguladoras estão sendo tomadas, como a Resolução de 10 de fevereiro de 2021 do Parlamento Europeu que aborda o tema da economia circular, mais especificamente sobre a criação de cadeias de valor para produção, reutilização e reciclagem de baterias na União Europeia (HALLEUX, 2021).

2.5. EVOLUÇÃO DO MERCADO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E BATERIAS DE SEGUNDA VIDA

Os mercados de veículos elétricos estão tendo um crescimento exponencial à medida que as vendas excederam 10 milhões em 2022. Um total de 14% de todos os carros novos vendidos foram elétricos em 2022, comparado a um aumento anual de cerca de 9% em 2021 e menos de 5% em 2020. Espera-se que as vendas de carros elétricos continuem crescendo em 2023. Mais de 2,3 milhões de carros elétricos foram vendidos no primeiro trimestre, cerca de 25% a mais do que no mesmo período do ano anterior. Atualmente, espera-se que as vendas cheguem em 14 milhões até o final de 2023, representando um aumento de 35% em relação ao ano de 2022, com novas compras acelerando no segundo semestre deste ano. Como resultado, os carros elétricos podem representar 18% das vendas totais de automóveis durante todo o ano. (IEA, 2023).

No Brasil, as vendas de veículos elétricos também vêm mostrando aumento considerável, apenas nos primeiros oito meses de 2023, houve crescimento de 76% em relação ao mesmo período de 2022, de acordo com dados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) (Brasil, 2023). Em outubro de 2023, 2.370 veículos da categoria foram comercializados no país, marcando novo recorde de emplacamentos do segmento em um único mês, e apresentando crescimento de 272% em relação ao mesmo período de 2022 (Drehmer, 2023).

Nota-se o aumento na venda e utilização de veículos elétricos e tendência de crescimento nos próximos anos. Com a disseminação dos veículos elétricos, como consequência haverá uma quantidade significativa de baterias aposentadas ao atingirem 80% de sua potência nominal (Xu *et al.*, 2021). Caso não seja dado um novo destino para estas peças, podemos ter um cenário mundial caracterizado pelo desperdício econômico (Hossain *et al.*, 2019).

Além do aspecto econômico inerente à discussão de baterias de segunda vida, é importante considerar o conceito de sustentabilidade implícito. A reciclagem para obter materiais da composição de baterias, como o lítio, apresenta um custo maior do que sua obtenção em fontes primárias (Hossain *et al.*, 2019). Assim, há o desafio de encontrar possíveis aplicações que aceitem a inclusão de baterias de segunda vida.

Com o aumento das vendas de veículos elétricos, uma característica chave de seu funcionamento são as baterias, evidenciando uma conexão entre ambas as tecnologias. Assim, pesquisas têm sido realizadas para aprimorar os componentes e as características de projeto das baterias. Um exemplo são pesquisas realizadas envolvendo o catodo e optando por matérias menos dependentes de cobalto e gerando maior densidade energética e redução dos preços dessa tecnologia (BUNSEN *et al.*, 2020). Políticas governamentais para o apoio ao desenvolvimento e aprimoramento das baterias são implementadas na China, na União Europeia (pelo *Strategic Action Plan for Batteries in Europe*), no Japão e na Coreia e outros países (BUNSEN *et al.*, 2020).

Considerando baterias de segunda vida, diferentes aplicabilidades foram encontradas na literatura. A classificação adotada neste estudo para tais foi feita relacionando seu uso com o setor socioeconômico a que melhor se relaciona, podendo ser estes: residencial, comercial, industrial e serviços da rede. Nota-se a bateria ofertando serviços para: diferimento de investimentos de transmissão e distribuição (CASALS; AMANTE GARCÍA; CANAL, 2019), arbitragem de energia (SAEZ-DE-IBARRA *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2020), regulação de área/regulação de frequência (CANALS CASALS; BARBERO; CORCHERO, 2019; CASALS; AMANTE GARCÍA; CANAL, 2019), redução de pico (*peak-shaving*) (KAMATH *et al.*, 2020b), nivelamento de carga (AZIZ; ODA; KASHIWAGI, 2015), qualidade de energia (KAMATH *et al.*, 2020b; SUN; SUN; MOURA, 2016), gestão de carga e demanda (XU *et al.*, 2021), integração de fontes renováveis (SAEZ-DE-IBARRA *et al.*, 2015; SUN; SUN; MOURA, 2016), carga de veículos elétricos (HEGAZY *et al.*, 2015).

3. ANÁLISE ECONÔMICA PARA INCLUSÃO DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA PARA PROSSUMIDORES NO BRASIL

Nesta seção, propõe-se um estudo a respeito da inclusão de baterias de segunda vida em sistemas elétricos residenciais, mais especificamente para prossumidores - usuários capazes de consumir e produzir energia (Bryant *et al.*, 2018). O estudo considera um consumidor residencial, localizado no Brasil, portador de geração fotovoltaica através de painéis solares. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo de caso, considerando um perfil específico de consumidor com geração fotovoltaica residencial, onde a finalidade é estabelecer a viabilidade ou não da inclusão de uma bateria de segunda vida nesse contexto. Sendo o principal motivador dessa investigação, a proposta de revisão da Resolução Normativa nº 482/2012 (REN 482) e o impacto econômico subsequente nos investimentos em geração distribuída (GD) de energia solar que esta trará, caso aprovada.

No Brasil, a REN 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) é o principal documento oficial que aborda a micro e mini geração distribuída proveniente de fontes renováveis. Neste são apresentadas as condições de acesso ao sistema interligado nacional (SIN) por parte de unidades de geração distribuída, além de estabelecido o sistema de compensação nacional de energia elétrica (SCEE), como é conhecido hoje. Também conhecido como *Net Metering*, este sistema de compensação consiste na injeção do excedente de energia elétrica ativa gerada pelo prossumidor na rede, sendo esta energia devolvida a ele em forma de créditos (em kWh), podendo estes serem abatidos da sua fatura de energia elétrica do mês corrente ou nos 60 meses subsequentes.

A Consulta Pública ANEEL n.º 25/2019 propôs uma revisão no modelo do SCEE. As mudanças propostas incluíam custos de utilização da rede elétrica para a injeção do excedente da energia gerada pelos pequenos prossumidores, tendo até a capacidade de reduzir o desenvolvimento amplo de GD através de fontes renováveis de energia.

Em 6 de janeiro de 2022 foi sancionada a Lei 14.300/2022 que consiste em uma legislação brasileira que trata de diversos aspectos relacionados à geração distribuída de energia elétrica e à micro e minigeração de energia. Com isso, ocorreram importantes mudanças para o setor energético, principalmente o estabelecimento de

novas regras para o setor de energia solar e outras fontes renováveis. Algumas de suas principais características valem ser destacadas:

- 1) Criação do Marco Legal da Geração Distribuída: A Lei 14.300 promoveu o estabelecimento do Marco Legal da Geração Distribuída, que reconhece o direito dos consumidores de gerarem sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e de compartilharem essa energia excedente com a rede elétrica.
- 2) Limites de Capacidade: definição de limites para a capacidade de geração de energia de sistemas de micro e minigeração, com diferentes critérios para consumidores residenciais, comerciais e industriais.
- 3) Compensação de Energia: manutenção da modalidade de compensação de energia, onde o excedente de energia gerada é injetado na rede e utilizado para abater o consumo futuro de energia do mesmo consumidor ou de unidades consumidoras diferentes.
- 4) Redução de Créditos: A Lei 14.300 prevê uma redução gradual na compensação de energia excedente ao longo dos anos, mas de maneira menos acentuada em comparação com regras propostas anteriormente.

A Tabela 4 traz um comparativo com as principais diferenças entre a Lei 14.300 e a REN 482.

Os aspectos a serem abordados nas simulações do modelo proposto são divididos em:

- 1) Análise de viabilidade econômica da utilização de baterias de segunda vida por prosumidores no contexto brasileiro de energia elétrica, levando em consideração os dois cenários normativos.
- 2) Utilização de sistemas de tarifa branca e convencional específicas do Brasil no gerenciamento do fluxo de energia para uma residência juntamente com uma modelagem que considera valores atualizados de uma bateria com 70% de sua vida útil e sua respectiva degradação.

Tabela 4 - Comparativo entre a REN482 e a Lei 14.300.

	REN 482/2012	Lei 14.300/2022
Base Legal	Regulamentação da ANEEL	Legislação federal que modifica o quadro legal para a GD
Limites de Capacidade	Limites específicos de capacidade para micro e minigeração	Sistemas com capacidade de até 5 MW
Transição Gradual	Transição mais gradual na redução dos créditos de energia excedente	Regras de transição mais curtas
Participação de Consumidores	Direito à autogeração e à comercialização de excedentes	Foco na relação com as concessionárias

Fonte: (ANEEL, 2018) e (BRASIL, 2022).

4. METODOLOGIA PROPOSTA

O estudo utiliza como base um prosumidor com geração fotovoltaica instalada de potência nominal de 7,2 kW e dados reais de consumo e irradiância ao longo de 1 ano. Vale a pena ressaltar que foram encontradas referências na literatura se referindo a baterias provenientes de veículos elétricos sendo aposentadas com vida útil variando entre 70% a 80% (Martinez-Laserna *et al.*, 2018). Por isto, foram consideradas baterias aposentadas com 70% da sua vida útil (Xu *et al.*, 2020, Assunção *et al.*, 2016). A contribuição deste trabalho consiste na avaliação do uso de uma bateria de íon-lítio de segunda vida em conjunto ao sistema fotovoltaico da residência, considerando as recentes alterações na legislação brasileira, cenário de geração distribuída e viabilidade econômica. Para isso, a modelagem foi baseada em: (i) a estratégia de operação otimizada apresentada por Deotti *et al.* (2020), (ii) dados reais de uma bateria de segunda vida, utilizada em primeira vida em um veículo elétrico do modelo Nissan Leaf e aposentada ao atingir 70% de sua capacidade, levantados por Xu *et al.*(2020) e Assunção *et al.*(2016), e (iii) a metodologia para o cálculo de degradação implementado em Xu *et al.*(2016).

4.1. MODELAGEM DO PROBLEMA

O modelo utilizado neste estudo é baseado em Deotti *et al.* (2020) e tem como objetivo a minimização do custo diário de operação do prosumidor, recorrendo-se da programação linear, com a utilização da toolbox *Linprog* em Matlab. Este modelo considera características e comportamentos reais do sistema com o intuito de minimizar os custos operacionais diários do prosumidor, considerando a utilização otimizada da eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico para atendimento adequado da carga residencial. A função objetivo a ser minimizada é representada pela Equação (1).

$$\min \sum_{t=1}^T T(t) \times [P_{rc}^t - P_{gc}^t - P_{bc}^t - (\gamma \times P_{gr}^t) + (-\delta_{gc}^t \times P_{gc}^t - \delta_{gb}^t \times P_{gb}^t)] \quad (1)$$

Em que $T(t)$ representa a tarifa de energia, em R\$/kWh, para cada instante t . Note que essa diferenciação em t é importante para a consideração de tarifas dinâmicas. As variáveis P_{gc}^t , P_{gb}^t , P_{gr}^t , P_{bc}^t e P_{rc}^t , dados em kWh, representam o fluxo de

energia entre o gerador fotovoltaico e carga; entre gerador e bateria; entre gerador e rede elétrica; entre bateria e carga; e entre rede elétrica e carga, respetivamente. Os parâmetros adimensionais δ_{gc}^t e δ_{gb}^t representam um incentivo econômico que priorizam o autoconsumo da bateria, adotados como 5 e 2, respetivamente. O fator de ponderação γ é utilizado para realizar a análise dos diferentes cenários regulatórios e é multiplicado pela parcela que interage com a rede (P_{gr}^t).

Como restrições, utilizando análise de dados a cada trinta minutos, diariamente, tal formulação conta com o balanço de geração e carga, restrições relativas à operação da bateria e à eficiência de carga e descarga (Deotti *et al.*, 2020). Essas estão apresentadas nas Equações (2) a (9), onde as Equações (2) e (3) representam o balanço energético da energia gerada pelo sistema fotovoltaico, e o balanço energético da demanda residencial em um determinado tempo t . As demais restrições, Equações (4) a (9), referem-se à gestão operacional da bateria. A Equação (4) define o estado de carga da bateria SoC^t , em função de seu $SoC^{t-\Delta t}$ anterior, sua taxa de autodescarga (SD) e a quantidade de energia carregada ou descarregada no espaço de tempo atual. Tendo em conta que as baterias não podem carregar e descarregar ao mesmo tempo, estas ações são representadas por uma única variável S^t , que é uma variável livre. As Equações (5) e (6) representam os limites de eficiência da bateria, enquanto que as Equações (8) e (9) representam os limites impostos pelas taxas de carga (λ_c) e descarga (λ_d) da bateria permitidas entre dois intervalos de tempo subsequentes (Δt), respetivamente.

$$P_{gc}^t + P_{gb}^t + P_{gr}^t = P_g^t \quad (2)$$

$$P_{gc}^t + P_{bc}^t + P_{rc}^t = P_c^t \quad (3)$$

$$SoC^t = SoC^{t-\Delta t} \times (1 - SD) + \frac{S^t}{B_{nom}} \quad (4)$$

$$S^t \times \eta_c \times \eta_{inv} \leq (SoC_{max} - SoC) \times B_{nom} \quad (5)$$

$$-S^t \times \eta_d \times 1/\eta_{inv} \leq (SoC - SoC_{min}) \times B_{nom} \quad (6)$$

$$S^t \times \eta_{inv} \leq \lambda_c \times B_{nom} \times \Delta t \quad (7)$$

$$-S^t \times 1/\eta_{inv} \leq \lambda_d \times B_{nom} \times \Delta t \quad (8)$$

B_{nom} , η_c , η_d , SD , SoC são parâmetros da bateria, sendo estes a capacidade nominal em kWh, eficiência percentual de carga, eficiência percentual de descarga, taxa de autodescarga (percentual anual) e o estado de carga (limitado ao SoC_{min} e ao SoC_{max} , que são os valores mínimo e máximo estipulados para o estado de carga), respectivamente. η_{inv} representa a eficiência inversor bidirecional utilizado no sistema. S^t é uma variável livre, cujo objetivo é representar a característica inerente às baterias de que estas não podem realizar os processos de carga e descarga simultaneamente.

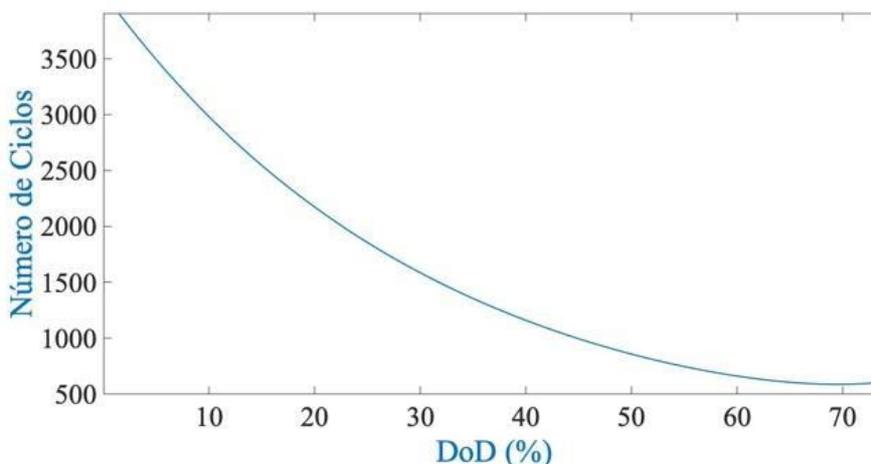
4.2. MODELO DE DEGRADAÇÃO DA BATERIA DE SEGUNDA VIDA

Neste estudo são considerados os efeitos da degradação referente ao calendário e da degradação referente ao número de ciclos realizados pela bateria durante seu período operacional.

Uma curva relacionando o número de ciclos e o DoD para uma bateria de segunda vida com 70% de sua capacidade é apresentada em Xu *et al.*, (2020). Usando valores aproximados desta, é possível chegar à simplificação apresentada em (9), onde, $a \approx 5441$; $b \approx -0,03165$; $c \approx 0,02964$ e $d \approx 0,1071$. A Figura 6 retrata essa curva.

$$L(DOD) = a \cdot \exp^{b \cdot DOD} + c \cdot \exp^{d \cdot DOD} \quad (9)$$

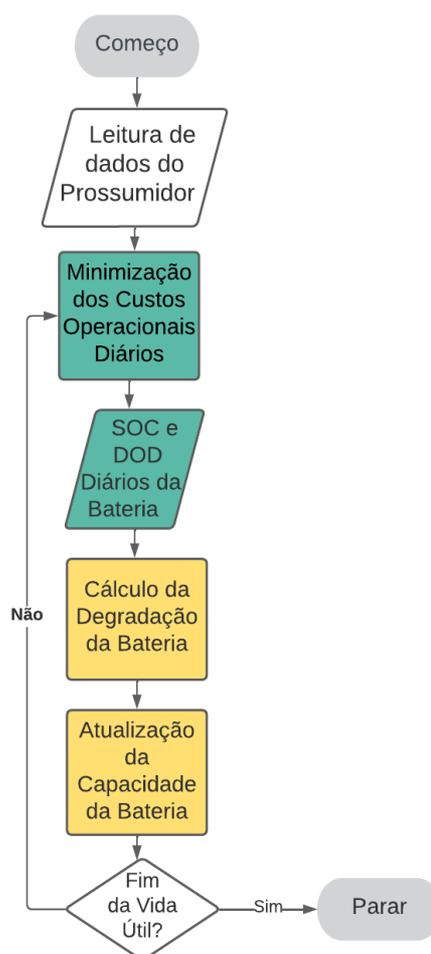
Figura 6 - Relação entre o número de ciclos e DoD.



Fonte: Adaptado de (Xu *et al.*, 2020).

A partir do cálculo da degradação da bateria é possível calcular periodicamente sua capacidade restante. A capacidade é um parâmetro atualizado no processo de gerenciamento energético estratégico do prosumidor. A simplificação da estratégia utilizada neste estudo pode ser verificada na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma do Modelo Proposto.



Fonte: (Elaboração Própria).

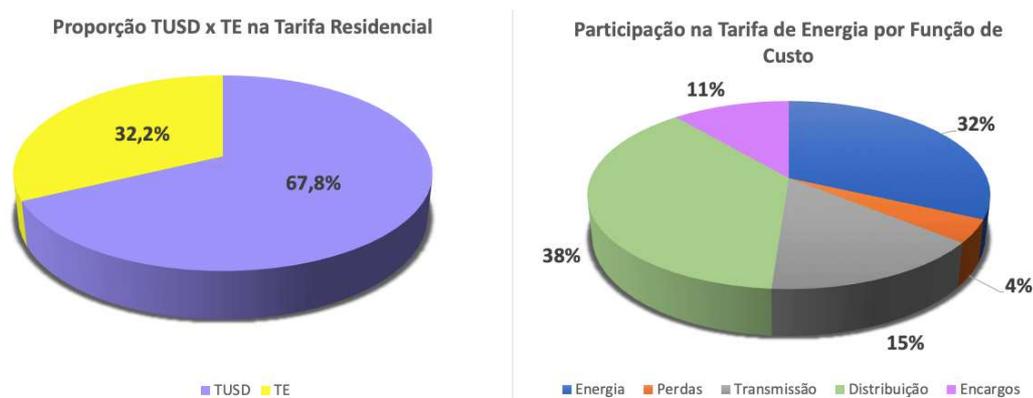
4.3. REGULAMENTAÇÃO

O modelo de compensação considerado segue o apresentado na Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída – Resolução Normativa no 482/2012, publicada no Relatório de Análise de Impacto Regulatório no 0004/2018-SRD/SCG/SMA/ANEEL como Alternativa 5. As alternativas levantadas para o modelo do Sistema de Compensação de Energia Elétrica se diferenciam pela forma como

valoram a energia injetada na rede, cada qual considerando determinadas componentes da tarifa de fornecimento de energia para tal valoração (ANEEL,2018).

Este modelo usa a proporção da parcela do custo da tarifa total de energia desconsiderando as parcelas referentes à Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e aos encargos da Tarifa de Energia (TE). Como fonte para cálculo dessa proporção, foram utilizados dados reais fornecidos pela ANEEL (2021b), dispostos na Figura 8.

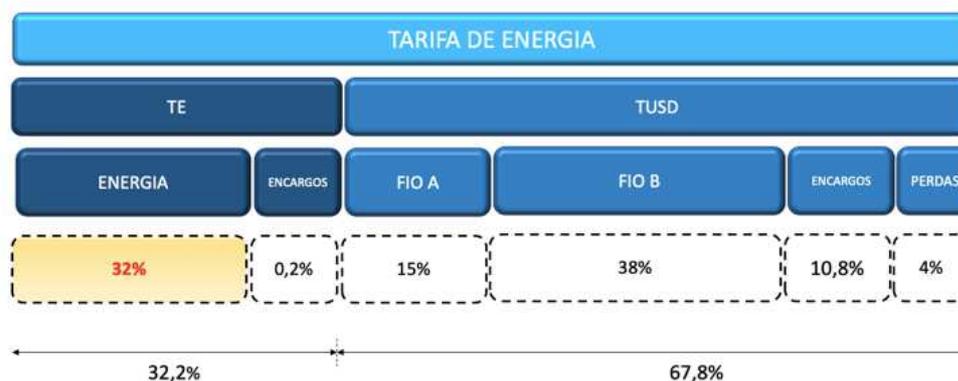
Figura 8 - Participação na Formação da Tarifa de Energia e Proporção de TUSD e TE.



Fonte: (Elaboração Própria).

Deste modo, é possível definir o modelo tarifário de compensação de acordo com o apresentado na Figura 9, onde a compensação da energia injetada é de apenas 32%. Esta foi baseada em (ANEEL,2018).

Figura 9 - Modelo Tarifário de Compensação.



Fonte: (Elaboração própria).

4.4. LEI Nº 14.300/2022 - MARCO LEGAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Com o intuito de estabelecer regras mais claras, previsíveis e consistentes para o setor de Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), em 7 de janeiro de 2022, a Lei Federal nº 14.300/2022 foi promulgada. Posteriormente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou essa lei por meio da Resolução Normativa (REN) nº 1.059/2023.

Uma das mudanças essenciais introduzidas pelo Marco Legal da Geração Distribuída diz respeito à alteração no Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Não será mais possível compensar integralmente todos os componentes da tarifa de eletricidade, excluindo os impostos. Em vez disso, a compensação será parcial, e a rede de distribuição será remunerada a partir do pagamento da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) Fio B, juntamente com outras parcelas correspondentes.

Para categorizar os consumidores envolvidos na Minigeração Distribuída (MMDG) de acordo com as regras de compensação, a ANEEL emitiu a Resolução Homologatória – REH 3.169/22. A partir dela, foi estabelecida uma classificação dos participantes do sistema de compensação em três grupos: GD I, GD II e GD III. A Figura 10 traz um breve explicativo dessa classificação e suas implicações tarifárias correspondentes.

Figura 10 - Classificação dos grupos de GD pela nova legislação.

	Descritivo	O que acontece?
GD I	Conexões existentes ou solicitadas até 7 de janeiro de 2023 (art. 26 da Lei n. 14.300/2022)	Permanecem nas regras antigas (Direito Adquirido) até 2045
GD II	Conexões solicitadas a partir de 8 de janeiro de 2023, que não se enquadram nas condições da GD III (caput do art. 27 da Lei n. 14.300/2022)	Pagamento gradativo e escalonado da TUSD Fio B iniciando em 15% no ano de 2023 até 90% em 2028 * As unidades que protocolarem solicitação de acesso entre o 13º e 18º mês a partir da publicação da Lei possuem a extensão do pagamento de 90% da TUSD Fio B até 2030
GD III	Conexões solicitadas a partir de 8 de janeiro de 2023, com potência instalada acima de 500 kW, em fonte não despachável na modalidade autoconsumo remoto ou na modalidade geração compartilhada, em que um único titular detenha 25% ou mais de participação do excedente de energia. (§ 1º do art. 27 da Lei n. 14.300/2022)	Pagamento de 2023 a 2028 de 100% TUSD Fio B + 40% TUSD Fio A + 100% TUSD P&D + 100% TE P&D 100% TUSD TFSEE * As unidades que protocolarem solicitação de acesso entre o 13º e 18º mês a partir da publicação da Lei permanecem nessa regra até 2030

Fonte: (Greener, 2023).

Para a ANEEL, fontes de energia despacháveis são aquelas que podem ser gerenciadas e programadas para suprir a demanda de energia em momentos específicos. Além disso, essas fontes têm a capacidade de armazenar a energia produzida para uso futuro. Exemplos disso incluem usinas hidrelétricas, que atualmente representam a principal fonte de energia em uso no Brasil, e a biomassa. A energia fotovoltaica pode ser considerada despachável, desde que atenda a certos critérios, sendo o principal deles a modulação da geração de energia por meio do uso de baterias, que devem representar pelo menos 20% da capacidade de geração mensal da central geradora.

Desta forma, para fins de simulação, o sistema considerado neste trabalho será enquadrado na categoria GDIII, no intuito de comparar o impacto da nova legislação na viabilidade da utilização da bateria de segunda vida em análise. Utilizando as proporções da tarifa de energia apresentadas na Figura 10, foi considerado um percentual de compensação de aproximadamente 56%, que pode ser obtido através do cálculo apresentado na Equação 10.

$$\text{Compensação (\%)} = 100\% - 40\% * FIO A - 100\% * FIO B \quad (10)$$

5. ESTUDO DE CASO

5.1. CENÁRIOS CONSIDERADOS

Para este estudo, foram considerados cenários hipotéticos nos quais o *Net Metering* deixaria de existir e casos nos quais existiria apenas compensação parcial. Entende-se que em um cenário de *Net Metering* com compensação de 100% da energia injetada na rede, não faz sentido a análise de viabilidade da bateria de segunda vida, já que o sistema de distribuição funciona como um armazenador de energia sem custo adicional.

A análise de viabilidade da inclusão de baterias de segunda vida para prosumidores residenciais é dividida nos quatro seguintes cenários:

(i) Sem *Net Metering* e Tarifa Convencional

- A) tarifa convencional e residência com módulos fotovoltaicos;
- B) tarifa convencional, residência com módulos fotovoltaicos e bateria de segunda vida;

(ii) Sem *Net Metering* e Tarifa Branca

- C) tarifa branca e residência com módulos fotovoltaicos;
- D) tarifa branca, residência com módulos fotovoltaicos e bateria de segunda vida.

(iii) Com *Net Metering* e Tarifa Convencional

- E) tarifa convencional, residência com módulos fotovoltaicos com compensação de energia de 32%;
- F) tarifa convencional, residência com módulos fotovoltaicos e bateria de segunda vida com compensação de energia de 32%;

(iv) Com *Net Metering* e Tarifa Branca

- G) tarifa branca, residência com módulos fotovoltaicos e com compensação de energia de 32%;
- H) tarifa branca, residência com módulos fotovoltaicos e bateria de segunda vida com compensação de energia de 32%;

(v) Com Net Metering e Tarifa Convencional (Lei 14.300)

E) tarifa convencional, residência com módulos fotovoltaicos com compensação de energia de 56%;

F) tarifa convencional, residência com módulos fotovoltaicos e bateria de segunda vida com compensação de energia de 56%;

(vi) Com Net Metering e Tarifa Branca (Lei 14.300)

G) tarifa branca, residência com módulos fotovoltaicos e com compensação de energia de 56%;

H) tarifa branca, residência com módulos fotovoltaicos e bateria de segunda vida com compensação de energia de 56%.

5.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para os cenários nos quais há o sistema de armazenamento de energia com baterias de segunda vida, considerou-se uma bateria com capacidade restante de 16,8 kWh cuja primeira vida se deu em veículos elétricos (capacidade em primeira vida de 24kWh) e foi aposentada ao alcançar 70% de sua vida útil (Assunção et al., 2016). Durante a pesquisa bibliográfica, foi constatada dificuldade para encontrar estudos referentes à utilização de baterias de segunda vida com parâmetros claros para baterias com 80% da capacidade. Os aspectos da bateria considerados relevantes para as simulações são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados da bateria de segunda vida.

Parâmetro	Valor	Referência
Capacidade (kWh)	16,8	(Xu et al., 2020)
Custo (R\$/kWh)	375,44	(Vehicle Technologies Office, 2023)
OeM (R\$/ano)	12,01	(Assunção et al., 2016)
Tx. Autodescarga (%/ano)	20	(Pereira, 2016)
Eficiência de Carga/Descarga (%)	95	(Xu et al., 2020)
Tx. Carga (C)	0,79	(vathy et al., 2021)
Tx. Descarga (C)	1	(Marano et al., 2009)
Vida Útil (anos)	5	(Xu et al., 2020)

Fonte: (Elaboração Própria).

O custo da bateria de segunda vida foi estimado de acordo com o trabalho realizado por (Mathews et al., 2020), onde considera este como sendo referente a 50% do valor de uma bateria nova.

Os parâmetros relativos ao inversor (eficiência de 95%), ao sistema fotovoltaico (potência nominal de 7200 W, vida útil de 25 anos e degradação anual 7,5%) e os limites definidos para o estado de carga da bateria (SOC máximo de 0,8 e SOC mínimo de 0,2) foram mantidos conforme referenciado em Deotti *et al.* (2020). Para cálculo monetário, o valor do euro considerado para a conversão foi de 5,38 reais e do dólar americano de 4,91 reais, referentes ao mês agosto de 2023 (Banco Central do Brasil, 2023).

As tarifas relativas ao consumo de energia da rede elétrica pelo consumidor foram retiradas de ANEEL (2023) são referentes à distribuidora Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG-D) e estão dispostas conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Modelo Tarifário Considerado.

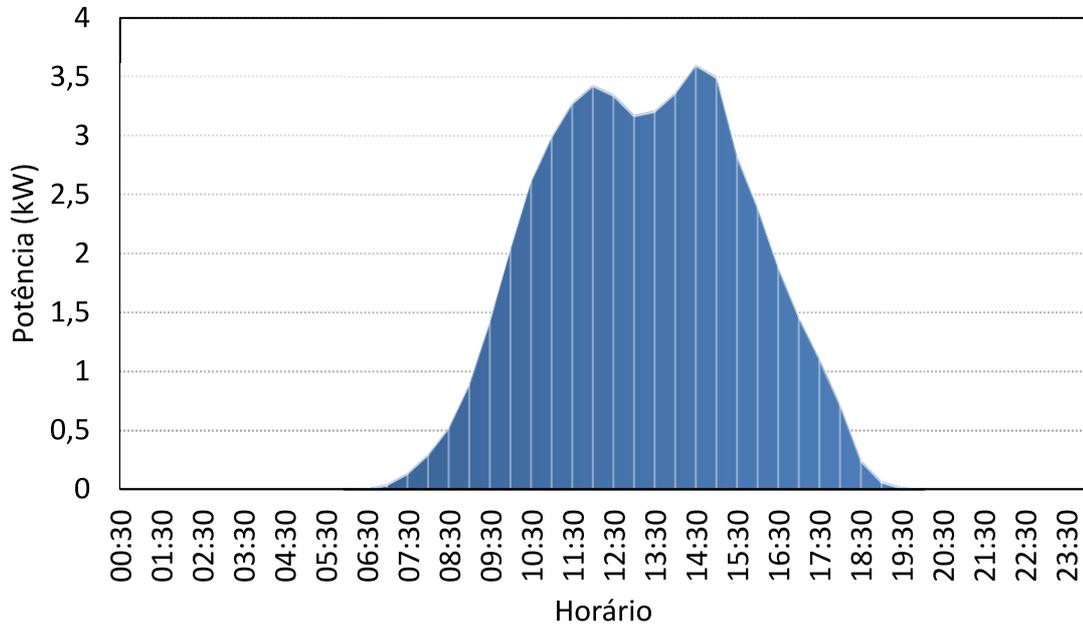
Tipo de Tarifa	Tarifa Sem Impostos			Tarifa Com Impostos		
	Preço 1 (R\$/kWh)	Preço 2 (R\$/kWh)	Preço 3 (R\$/kWh)	Preço 1 (R\$/kWh)	Preço 2 (R\$/kWh)	Preço 3 (R\$/kWh)
Convencional	0,749	-	-	0,962	-	-
Branca	0,620	0,951	1,451	0,797	1,222	1,864
PIS + CONFIS				4,17%		
ICMS				18,00%		

Fonte: (ANEEL,2023) e (EDP, 2023).

O valor considerado para PIS + CONFINS considera a média dos meses de setembro/2022 a agosto de 2023 e o ICMS fixado em 18% (EDP, 2023).

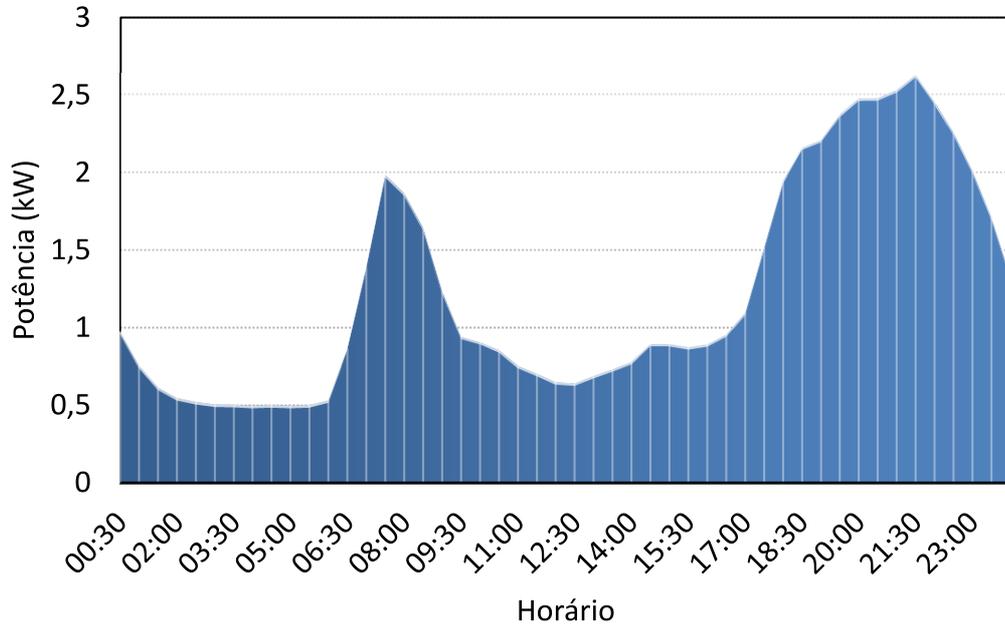
O perfil de geração e de consumo do prosumidor considerado pode ser contemplado na Figura 11 e Figura 12 respectivamente.

Figura 11 - Perfil de geração do prossumidor.



Fonte: Adaptado de Deotti *et al.* (2020).

Figura 12 – Perfil de consumo do prossumidor.



Fonte: Adaptado de Deotti *et al.* (2020).

6. RESULTADOS

Foram simulados casos nos quais o prosumidor possuiria a instalação apenas do sistema fotovoltaico (FV) e casos nos quais possuiria a associação do sistema fotovoltaico e da bateria de segunda vida (FV+BSV). Dessa forma, é possível quantificar a economia anual na conta de energia elétrica que a inclusão do sistema de armazenamento traz. Para analisar a viabilidade econômica e a atratividade do investimento em baterias de segunda vida são considerados dois índices: o Valor Presente Líquido (VPL) e o tempo de *Payback*. Os resultados obtidos para as simulações considerando os casos A, B, C, D, E, F, G e H, que estão evidenciados nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Resultado da simulação considerando a ausência de *Net Metering*.

Cenário		Sem Net Metering			
		Tarifa Convencional		Tarifa Branca	
		FV (A)	FV+BSV (B)	FV (C)	FV+BSV (D)
Fluxo rede-carga (kWh)		17.860	14.344	17.860	14.344
Vida Útil (anos)	60%	-	5,37	-	5,35
	50%	-	10,74	-	10,69
Valor da conta de energia (R\$/ano)		17.181	13.825	21.786	15.625
VPL	60%	-	1.616	-	1.073
	50%	-	5.523	-	3.897
Payback (anos)		-	2,7	-	1,46
Retorno do Investimento (%)	60%	-	84,9	-	239,5
	50%	-	267,4	-	574,4

Fonte: (Elaboração própria).

Tabela 8 - Resultado da simulação considerando a presença do *Net Metering*.

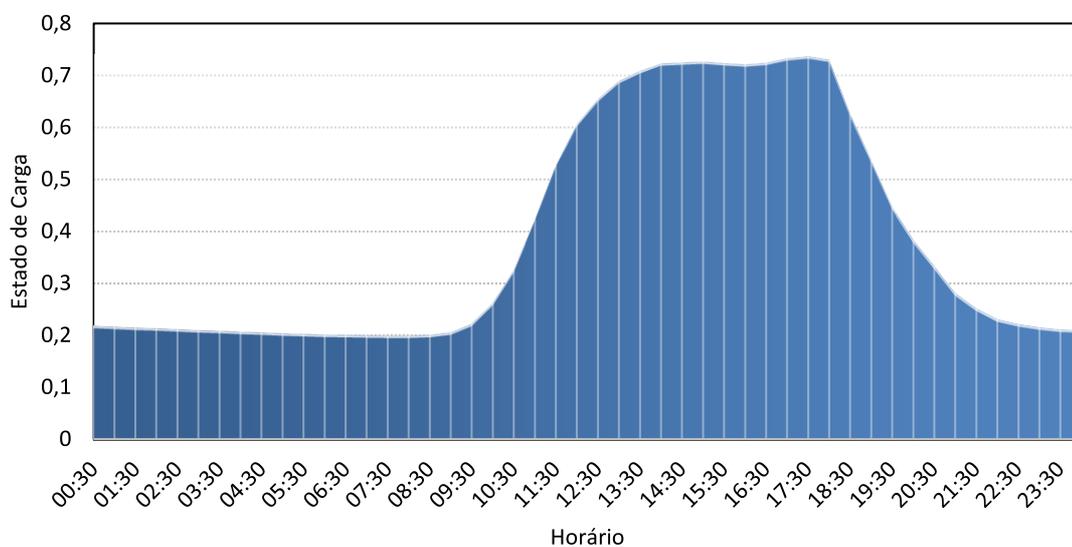
Cenário		Com Net Metering			
		Tarifa Convencional		Tarifa Branca	
		FV (E)	FV+BSV (F)	FV (G)	FV+BSV (H)
Fluxo rede-carga (kWh)		17.860	14.344	17.860	14.344
Vida Útil (anos)	60%	-	5,37	-	5,35
	50%	-	10,74	-	10,69
Valor da conta de energia (R\$/ano)		12.940	10.659	18.263	13.002
VPL	60%	-	543	-	2.066
	50%	-	1.407	-	4.164
Payback (anos)		-	3,96	-	1,72
Retorno do Investimento (%)	60%	-	25,7	-	189,9
	50%	-	149,7	-	475,9

Fonte: (Elaboração própria).

O perfil do SOC diário é apresentado na Figura 13. O problema de otimização foi concluído em 17.520 iterações. Na Figura 14 é apresentada a degradação da capacidade da bateria ao longo do seu tempo de operação.

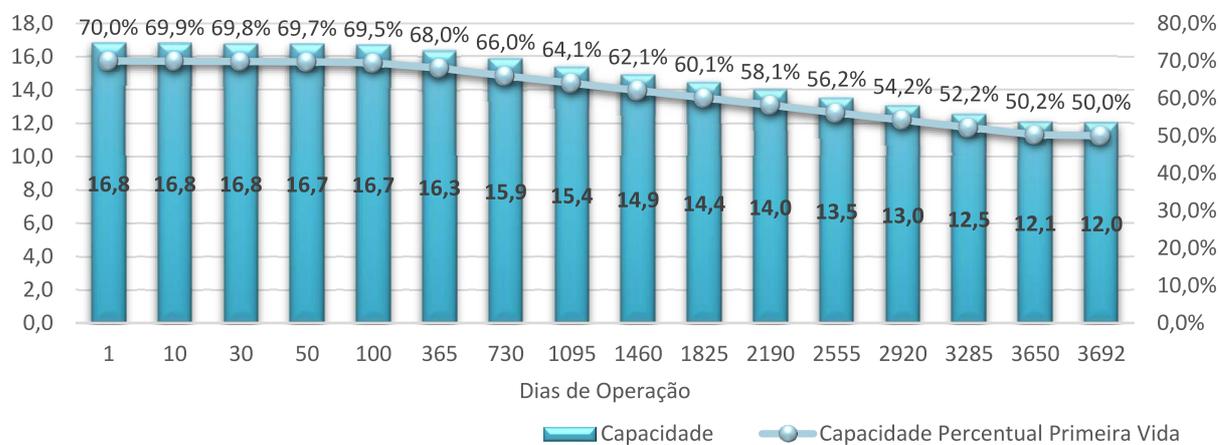
A vida útil da bateria de segunda vida foi calculada em 5 anos para uso até 60% da sua capacidade de armazenamento original e 10 anos para utilização até 50%, tais valores seguiram os estudos apresentados em (Xu *et al.*, 2020) e (Wangsupphaphol *et al.*, 2023).

Figura 13 - SOC diário.



Fonte: (Elaboração própria).

Figura 14 - Degradação da capacidade da bateria.



Fonte: (Elaboração própria).

Foram realizadas simulações considerando cenários de 56% de compensação, conforme nova legislação. Os resultados são apresentados estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado da simulação considerando categoria GDIII da Lei 14.300.

Cenário		Lei 14.300			
		Tarifa Convencional		Tarifa Branca	
		FV (E)	FV+BSV (F)	FV (G)	FV+BSV (H)
Vida Útil (anos)	60%	-	5,37	-	5,35
	50%	-	10,74	-	10,69
Valor da conta de energia (R\$/ano)		9.760	8.251	15.621	11.128
VPL	60%	-	5.179	-	4.719
	50%	-	7.259	-	6.222
Payback (anos)		-	5,98	-	2
Retorno do Investimento (%)	60%	-	-16,9	-	147,6
	50%	-	65,2	-	391,9

Fonte: (Elaboração própria).

6.1. DISCUSSÃO

A Tabela 7 traz o cenário ideal para a utilização de sistemas de armazenamento de energia: onde não existe sistema de compensação para o prossumidor, sendo essencial e o uso de baterias e tornando tal investimento mais atrativo. A Tabela 8 apresenta o cenário proposto pela REN 482 (alternativa 5) onde existe compensação parcial da energia injetada pelo consumidor – de aproximadamente 32%. A Tabela 9 segue a nova legislação, onde o prossumidor estudado receberia compensação parcial de aproximadamente 56%. A partir da comparação entre os resultados das tabelas citadas, é possível concluir que, quanto maior o percentual de compensação menos atrativo é investir em um sistema próprio de armazenamento, visto que se pode considerar que a rede teria um comportamento semelhante de “armazenamento”.

Através da análise dos resultados, é possível notar que, nos casos considerando a tarifa branca (C, D, G e H), o VPL do investimento obtido tanto ao estimar a vida útil da bateria até 60% quanto até 50% é positivo, caracterizando a atratividade do

investimento. O tempo de *Payback* obtido é menor quando comparado com a tarifa convencional e ambos se encontram abaixo dos 4 anos. Como a vida útil mais curta da bateria seria de 5,35 anos, tais cenários se mostram opções viáveis de investimento.

A análise de todos os cenários considerados, com e sem *net metering* e considerando tarifa branca e convencional, o VPL do investimento se mostra sempre positivo, tanto para o fim da vida útil da bateria de até 60% quanto 50%. O *Payback*, em todos estes cenários, se mostra menor que o tempo mais pessimista de vida útil da bateria, indicando viabilidade do investimento.

Ao analisar a taxa do retorno de investimento, é possível concluir que, os valores obtidos são significativamente positivos, o que geralmente é um bom indicativo. Isso sugere que os investimentos têm potencial para gerar um retorno financeiro considerável em comparação com os custos iniciais. Sendo que, os cenários mais atrativos de investimento encontram-se na ausência do *net metering*.

É de salientar que o retorno do investimento ocorre de forma mais contundente no caso da aplicação de tarifa branca, especialmente para o cenário com *net metering*. Isso ocorre pelo fato de que, com a inclusão da bateria, o consumidor de energia é capaz de armazenar energia em períodos de menor tarifa e fornecê-la posteriormente em períodos de tarifa mais elevada. Isto implica uma maior economia para o consumidor e, conseqüentemente, um retorno mais rápido de seu investimento.

Quando considerada a presença do *Net Metering*, nota-se que o VPL diminui e o tempo de *Payback* aumenta, indicando que o retorno do investimento será menor quando comparado com os cenários que não consideram o *net metering*. Porém, ainda se obteve um cenário que indica a viabilidade do investimento em baterias de segunda vida para sistemas de armazenamento de energia considerando um dos possíveis cenários da ANEEL para cobrança e tributação.

Em Deotti *et al.*, (2020) os resultados obtidos avaliando a viabilidade econômica de cenários com e sem a utilização de baterias (para estes, baterias de primeira vida) mostram baixa atratividade financeira devido o alto custo de investimento inicial. Por apresentarem custo de investimento consideravelmente menor, baterias de segunda vida tendem a retornar cenários mais favoráveis no que se refere ao VPL, o que foi confirmado por este estudo. Ao se considerar o cenário menos benéfico para o prosumidor, com a presença de *net metering*, obteve-se VPL positivo ao utilizar a tarifa branca. Considerando que para o pior cenário obteve-se VPL positivo com tarifa

branca, tais resultados indicam um cenário de investimento promissor ao considerar baterias de segunda vida como sistema de armazenamento de energia.

A simulação realizada considerando o sistema em questão na categoria de GDIII da nova Lei 14.300 mostra inviabilidade do investimento considerando a bateria de segunda vida para o cenário de tarifa convencional e sobrevida de 5 anos, visto que o tempo de *payback* seria maior que este e o ROI (retorno do investimento) seria negativo. Para permitir a viabilidade da utilização da bateria de segunda vida, neste caso, seria necessário que o valor de venda desta estivesse aproximadamente igual a 40% do valor de uma bateria de segunda vida – resultado obtido variando a depreciação monetária da bateria de segunda vida em relação à bateria nova.

Os investimentos considerados apresentaram valores de *payback* que variaram entre 543 a 7.259 e o ROI apresentou valores entre 25,7 e 574,4 – o que, economicamente, mostra viabilidade da implantação de baterias de segunda vida, tanto em cenários com e sem *net metering*. O único cenário que apresentou risco de inviabilidade foi aquele com *net metering* e Tarifa Branca (Lei 14.300), apresentado na Tabela 9, onde o tempo de *payback* mostrou-se 0,98 anos maior que a vida útil simulada da bateria de segunda vida.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho aborda o crescimento das energias renováveis e a necessidade de lidar com a intermitência delas na matriz energética, destacando o aumento da utilização de veículos elétricos e dos sistemas de armazenamento de energia. A questão central é equilibrar a variabilidade da geração renovável e reutilização baterias de carros elétricos aposentadas. O trabalho busca preencher essa lacuna ao examinar a posição atual dessas baterias e seus parâmetros para reaplicações. Além disso, explora aplicações, modelos de negócios e barreiras para disseminar essa prática. As principais contribuições incluem a análise da viabilidade econômica no Brasil e o uso de tarifas elétricas específicas para gerenciar o fluxo de energia em residências com baterias reutilizadas.

Através da revisão bibliográfica realizada a respeito da participação dos sistemas de armazenamento de energia (baterias) nos mercados de eletricidade e a reutilização de baterias de segunda vida retiradas de veículos elétricos, concluiu-se que a busca por aplicações e determinação da viabilidade de operação e investimento de baterias de segunda vida estão em ascensão, principalmente devido ao crescimento do mercado de veículos elétricos e à necessidade de aliar o descarte/reciclagem consciente de baterias com alternativas rentáveis oportunidades e negócios.

Quando se trata da aplicabilidade das baterias de segunda vida, percebeu-se que a maioria dos modelos de negócios está relacionada a aplicações residenciais, sendo a maior lacuna aplicações na área industrial. Há também grande número de pesquisas relacionadas a aplicações em serviços auxiliares.

Com relação aos aspectos técnicos da utilização de baterias de segunda vida, foi encontrado grande quantidade de material contendo diferentes métodos para estimar os parâmetros necessários para a bateria após o término de sua primeira vida, sendo grande parte relacionada a sua aplicação em primeira vida e aspectos relacionados à sua fabricação.

Assim, a utilização de baterias de segunda vida tem se tornado uma opção cada vez mais viável e de interesse de diversos atores envolvidos nessa cadeia produtiva.

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível avaliar a viabilidade da inclusão de baterias de segunda vida para sistemas de armazenamento de energia para o caso de prossumidores no Brasil. Essa possível aplicação mostrou tendência de viabilidade, especialmente ao se levar em conta seu menor custo de investimento

quando comparado a baterias novas. Além disso, tal proposta vai ao encontro do cenário previsto para um futuro próximo, onde haveria grande oferta de baterias aposentadas de veículos elétricos ao atingirem cerca de 70% de sua vida útil. Ao incluir as perspectivas ambientais no tema, a utilização de baterias de segunda vida ganha ainda mais peso, visto que os aspectos poluentes referentes ao seu descarte seriam minimizados, resultando em uma economia mais sustentável.

As simulações realizadas durante o trabalho mostram a viabilidade no investimento em baterias, visto que as mudanças de legislação visam restringir a utilização da rede como um “armazenador” indireto da energia de prossumidores. Dessa forma, quanto menor o percentual de compensação, mais atrativo se faz o investimento. Além disso, em cenários onde o modelo tarifário é variável (tarifa branca) ter a capacidade de armazenar e despachar energia de forma otimizada se mostra atrativo economicamente.

A comparação do estudo utilizando, para este fim, baterias de segunda vida com estudos anteriores onde se foi avaliada a aplicação de baterias novas, tornou a alternativa viável devido à diferença no investimento inicial necessário – mesmo a primeira alternativa apresentando tempo de vida menor devido degradação inicial da bateria já avançada.

Trabalhos futuros contemplam a análise econômica da utilização destas baterias em serviços de energia e serviços ancilares, visando maximizar os benefícios para o prossumidor e estudar o regime de operação adequado às baterias de segunda vida, visando maximizar o seu tempo de vida útil.

REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Postos Tarifários e Valores de Tarifa de Cada Distribuidora.** Disponível: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiMTEzZDgyMzctNGQzZS00MTVklTg3M2UtOGMwNjBjMzM2MGVmlwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9> Acesso em: 06 ago. 2023.

ANEELb - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório Evolução das Tarifas Residenciais.** Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>>. Acesso em: 25 mai. 2023.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de abril de 2012; Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, Brazil, 2012. Retirado de <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> (Acesso em 17/07/2023).

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída – Resolução Normativa no 482/2012. **Relatório de Análise de Impacto Regulatório no 0004/2018-SRD/SCG/SMA/ANEEL. 2018.** Retirado de https://git.aneel.gov.br/publico/centralconteudo/-/raw/main/manuaisinstrucoes/air/Modelo_AIR_SRD_Geracao_Distribuida.pdf (acesso em 17/07/2023).

AHMADI, Leila *et al.* Energy efficiency of Li-ion battery packs re-used in stationary power applications. **Sustainable Energy Technologies and Assessments** v. 8, p. 9–17 , 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2014.06.006>>.

ANISIE, Arina; OCENIC, Elena; BOSHELL, Francisco; MEHROTRA, Shikhin. Redesigning Capacity Markets. **International Renewable Energy Agency - IRENA**, p. 1-18, 2019. Disponível em: <www.irena.org>.978-92-9260-130-0>.

ASSUNÇÃO, André; MOURA, Pedro S.; DE ALMEIDA, Aníbal T. Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy. **Applied Energy** v. 181, p. 120–131 , 2016.

AZIZ, Muhammad; ODA, Takuya; KASHIWAGI, Takao. Extended Utilization of Electric Vehicles and their Re-used Batteries to Support the Building Energy Management System. **Energy Procedia** v. 75, p. 1938–1943 , 2015.

Banco Central do Brasil. Cotação de Moedas. Retrieved from <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/cotacoesmoedas>, 2023.

BERECIBAR, Maitane *et al.* State of health estimation algorithm of LiFePO₄ battery packs based on differential voltage curves for battery management system application. **Energy** v. 103, p. 784–796 , 2016.

BERRADA, Asmae; LOUDIYI, Khalid; ZORKANI, Izeddine. Valuation of energy storage in energy and regulation markets. **Energy** v. 115, p. 1109–1118 , 2016.

BERZI, Lorenzo *et al.* A model for system integration of second life battery, renewable energy generation and mobile network station. 2020, [S.l.]: **IEEE**, p.1–6. 2020.

Bhagavathy, S.M., Budnitz, H., Schwanen, T., & McCulloch, M. (2021). Impact of charging rates on electric vehicle battery life. Findings, 2021.

BloombergNEF. (2020). **Electric Vehicle Outlook 2020** Executive Summary [BloombergNEF]. Retirado de <https://bnef.turtl.co/story/evo-2020/page/6/1?teaser=yes>

BRASIL, LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm

BRASIL, M. . Vendas de carros elétricos crescem 76% no Brasil lideradas por híbridos. 29 de Setembro de 2023. Fonte: **epbr**: <https://epbr.com.br/vendas-de-carros-eletricos-no-brasil-cresceram-76-lideradas-por-hibridos/>

Bryant, S. T., Straker, K., & Wrigley, C. (2018). The typologies of power: Energy utility business models in an increasingly renewable sector. **Journal of Cleaner Production**, 195, 1032-1046.

BUNSEN, Till; CAZZOLA, Pierpaolo; D'AMORE, Léa; GORNER, Marine; SCHEFFER, Sacha; SCHUITMAKER, Renske; SGNOLLET, Hugo; TATTINI, Jacopo and TETER, Jacob. Global EV Outlook 2019 - Scaling-up the transition to electric mobility. **International Energy Agency**. 2020, p. 1-232. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em 14 mar. 2021.

CANALS, Lluç Casals; BARBERO, Mattia; CORCHERO, Cristina. Reused second life batteries for aggregated demand response services. **Journal of Cleaner Production** v. 212, p. 99–108 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.005>>.

CASALS, Lluç Canals; AMANTE GARCÍA, B.; CANAL, Camille. Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. **Journal of Environmental Management** v. 232, n. October 2017, p. 354–363 , 2019.

CERBANTES, Marcel Chuma; BRASIL, C. T. G. **Planejamento da operação de sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (Unesp). 2017.

Cheng, B. and Powell, W. B."Co-Optimizing Battery Storage for the Frequency Regulation and Energy Arbitrage Using Multi-Scale Dynamic Programming," in **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 9, no. 3, pp. 1997-2005, May 2018.

CHÉNOT, Yann. Renault eways : the group presents two major new energy storage projects. **Renault Group**, 2020 Disponível em: <<https://en.media.renaultgroup.com/news/renault-eways-the-group-presents-two-major-new-energy-storage-projects-6714-989c5.html>>. Acesso em 05 Julho 2021.

CHO, Joohyun; KLEIT, Andrew N. Energy storage systems in energy and ancillary markets: A backwards induction approach. **Applied Energy** v. 147, p. 176–183 , jun. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.114>>.

COLE, Wesley and FRAZIER, Will A. Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage. **National Renewable Energy Laboratory**, p. 1-23, 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73222.pdf>>.

DEOTTI, L., GUEDES, W., DIAS, B., SOARES, T. Technical and Economic Analysis of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems in the Brazilian Regulatory Context. **Energies** 13, 6517. 2020. <https://doi.org/10.3390/en13246517>

DESARNAUD, Gabrielle. Second Life Batteries: A Sustainable business opportunity, not a conundrum. **Capgemini Invent**. Disponível em: <<https://www.capgemini.com/2019/04/second-life-batteries-a-sustainable-business-opportunity-not-a-conundrum/>>. Acesso em 05 Jul 2021.

DREHMER, V. Vendas de carros elétricos crescem 272% no Brasil em um ano; BYD Dolphin lidera em outubro. Fonte: **AutoEsporte**: <https://autoesporte.globo.com/eletricos-e-hibridos/noticia/2023/11/vendas-de-carros-eletricos-crescem-272percent-no-brasil-em-um-ano-byd-dolphin-lidera-em-outubro.ghtml> Acesso em 10 de Novembro de 2023,

EDP. ICMS, PIS e COFINS. EDP. Disponível em: [https://www.edp.com.br/icms-pis-e-cofins/#:~:text=O%20PIS%20e%20a%20COFINS,%2C00%25%20\(COFINS\)](https://www.edp.com.br/icms-pis-e-cofins/#:~:text=O%20PIS%20e%20a%20COFINS,%2C00%25%20(COFINS)). Acesso em Agosto de 2023.

EUROSTAT. Renewable Energy Statistics. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics>. Acesso em: 14 mar. 2021.

FOUDATION, Audi Environmental. Second-life battery: Green power from used batteries. **Audi Environmental Foudation**. Disponível em: <<https://www.audi-umweltstiftung.de/umweltstiftung/en/projects/greenovation/nunam.html>>. Acesso em: 05 Julho 2021.

Greener. **Valoração dos custos e benefícios da GD: o que foi definido?** 05 de Julho de 2023. Fonte: www.greener.com.br: https://www.greener.com.br/valoracao-dos-custos-e-beneficios-da-gd-o-que-foi-definido/?doing_wp_cron=1697329477.3820569515228271484375 Acesso em Outubro de 2023.

GONZÁLEZ, Pablo *et al.* Joint energy and reserve markets: Current implementations and modeling trends. **Electric Power Systems Research** v. 109, p. 101–111 , 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2013.12.013>>.

HALLEUX, Vivienne. New EU regulatory framework for batteries – Setting

sustainability requirements. European **Parliament Think Tank**. Disponível em <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI\(2021\)689337_EN.pdf#:~:text=Building%20on%20this%2C%20the%20proposal%20for%20a%20regulation,chains.%20The%20proposal%20is%20part%20of%20the%20European](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI(2021)689337_EN.pdf#:~:text=Building%20on%20this%2C%20the%20proposal%20for%20a%20regulation,chains.%20The%20proposal%20is%20part%20of%20the%20European)>: Acesso em 05 Jul 2021.

HEGAZY, Omar *et al.* Modeling and analysis of a hybrid PV/Second-Life battery topology based fast DC-charging systems for electric vehicles. **IEEE**, p.1–11, 2015.

HENZE, V. (2019, December 3). Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019 [**BloombergNEF**]. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/?sf113554299=1>

HEREDIA, F. Javier; CUADRADO, Marlyn D.; CORCHERO, Cristina. On optimal participation in the electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems. **Computers and Operations Research** v. 96, p. 316–329 , 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.03.004>>.

HESSE, H.C.; SCHIMPE, M.; KUCEVIC, D.; JOSSEN, A. “Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. **Energies** 2017, 10, 2107.

HOSSAIN, Eklas *et al.* A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. **IEEE Access** v. 7, p. 73215–73252 , 2019.

IEA. Trends in batteries – Global EV Outlook 2023 – Analysis. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries>>.

IRENA, Alcançado crescimento recorde em energias renováveis apesar da crise energética. 2023. Disponível em: <<https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Mar/Record-Growth-in-Renewables-Achieved-Despite-Energy-Crisis-PT>>.

IRENA, **World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway 2021**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRLE, Roland. Global EV Sales for 2022. **EV-volumes.com**. Disponível em: <<http://www.ev-volumes.com/>>. Acesso em: 12 de julho de 2023.

JANOTA, Lukáš; KRÁLÍK, Tomáš; KNÁPEK, Jaroslav. Second Life Batteries Used in Energy Storage for Frequency Containment Reserve Service. **Energies** v. 13, n. 23, p. 6396 , 2020.

JIANG, Yan; JIANG Jiuchun; ZHANG, Caiping; ZHANG, Weige; GAO, Yanga. State of health estimation of second-life LiFePO₄ batteries for energy storage applications. **Journal of Cleaner Production** v. 205, p. 754–762 , 2018.

JING, Wenlong; LAI, Chean Hung; WONG, Wallace S.H.; Wong, M.L. Dennis. A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for

standalone PV power system in rural electrification. **Applied Energy** v. 224, n. January, p. 340–356, ago. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.106>>.

JOHNSON, Megan. Nissan and EDF Energy partner to advance low carbon transport. **EDF Energy**. Disponível em: <<https://www.edfenergy.com/media-centre/news-releases/nissan-and-edf-energy-partner-advance-low-carbon-transport>>. Acesso em 05 Jul 2021.

KAMATH, Dipti; ARSENAULT, Renata; KIM, Hyung Chul; ANCTIL, Annick. Economic and Environmental Feasibility of Second-Life Lithium-Ion Batteries as Fast-Charging Energy Storage. **Environmental Science & Technology**. 2020a.

KAMATH, Dipti; SHUKLA, Siddharth; ARSENAULT, Renata; KIM, Hyung Chul; ANCTIL, Annick. Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications. **Waste Management** v. 113, p. 497–507, 2020b.

KAMATH, Dipti; SHUKLA, Siddharth; ANCTIL, Annick. An Economic and Environmental Assessment of Residential Rooftop Photovoltaics with Second Life Batteries in the US. **IEEE**, 2019. p.2467–2471, 2019.

KEIL, Peter et al. Lifetime analyses of lithium-ion EV Batteries. In: **3rd Electromobility Challenging Issues conference (ECI)**, Singapore, 1st–4th December. 2015.

LAB, Energy Futures. *Solarbox Project*. **Energy Futures Lab**. Disponível em: <<https://energyfutureslab.blog/2019/01/10/second-life-energy-storage-applications-in-developing-countries/>>. Acesso em 05 Jul 2021.

LABELEC, EDP. POCITYF - Leading the smart evolution of historical cities. **POCITYF**. Disponível em: <<https://pocityf.eu/about/>>. Acesso em 05 Jul. 2021.

LI, Jun; WANG, Yu; TAN, Xiaojun. Research on the Classification Method for the Secondary Uses of Retired Lithium-ion Traction Batteries. **Energy Procedia** v. 105, p. 2843–2849, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.625>>.

LI, Xiangjun; WANG, Shangxing. A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, jun. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8735431>>.

LUND, Peter D. *et al.* Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 45, p. 785–807, maio 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>>.

MALHOTRA, Abhishek *et al.* Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 56, p. 705–721, 2016.

Marano, V., Onori, S., Guezennec, Y., Rizzoni, G., & Madella, N. (2009, September). Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles. In 2009 IEEE

Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 536-543). IEEE.

MARTINEZ-LASERNA, Egoitz *et al.* Technical Viability of Battery Second Life: A Study from the Ageing Perspective. **IEEE Transactions on Industry Applications** v. 54, n. 3, p. 2703–2713 , 2018.

MATHEWS, Ian *et al.* Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging. **Applied Energy** v. 269, n. January, p. 115127 , 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115127>>.

MICARI, S *et al.* Ageing effects prediction on Lithium-Ion Batteries in second-life applications. **IEEE**, p.201–206, 2020.

MURNANE, Martin; GHAZEL, Adel. A closer look at state of charge (SOC) and state of health (SOH) estimation techniques for batteries. **Analog devices** v. 2, p. 426–436 , 2017.

Neubauer, J., Smith, K., Wood, E., & Pesaran, A. (2015). Identifying and overcoming critical barriers to widespread second use of PEV batteries (No. NREL/TP-5400-63332). **National Renewable Energy Lab.(NREL)**, Golden, CO (United States).

NGUYEN, Cong-Long *et al.* A cost-effective standalone e-bike charging station powered by hybrid wind and solar power system including second-life BESS. **IEEE**, p.3684–3690, 2020.

PADMANABHAN, Nitin; AHMED, Mohamed; BHATTACHARYA, Kankar. Battery Energy Storage Systems in Energy and Reserve Markets. **IEEE Transactions on Power Systems** v. 35, n. 1, p. 215–226 , 2020.

Pereira, N. M. C. (2016). Simulação de Regimes de Carga e Descarga em Baterias (Doctoral dissertation, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa). Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/83043004.pdf> (acesso em 17/05/2021).

PODIAS, Andreas *et al.* Sustainability assessment of second use applications of automotive batteries: Ageing of Li-ion battery cells in automotive and grid-scale applications. **World Electric Vehicle Journal** v. 9, n. 2 , 2018.

QUINARD, Honorat *et al.* Fast electrical characterizations of high-energy second life lithium-ion batteries for embedded and stationary applications. **Batteries** v. 5, n. 1 , 2019.

SAEZ-DE-IBARRA, Andoni *et al.* Second life battery energy storage system for residential demand response service. **IEEE**, p.2941–2948, 2015.

SAEZ-DE-IBARRA, Andoni *et al.* Sizing Study of Second Life Li-ion Batteries for Enhancing Renewable Energy Grid Integration. **IEEE Transactions on Industry Applications** v. 52, n. 6, p. 4999–5007 , 2016.

SALLES, Mauricio B.C. *et al.* Potential arbitrage revenue of energy storage systems in PJM. **Energies** v. 10, n. 8 , 2017.

SALZA. Pasquale *et al.* 2nd Life Batteries - A white paper from Storage Technological

Community. **Global Sustainable Electricity Partnership**. 2021. Disponível em: <https://www.globalelectricity.org/content/uploads/GSEP_Storage_Community_final_with-Enel-Comments.pdf >.

SONG, Ziyu *et al.* Economy analysis of second-life battery in wind power systems considering battery degradation in dynamic processes: Real case scenarios. **Applied Energy** v. 251, n. March , 2019.

STRICKLAND, Dani *et al.* Estimation of transportation battery second life for use in electricity grid systems. **IEEE Transactions on Sustainable Energy** v. 5, n. 3, p. 795–803 , 2014.

SUN, Chao; SUN, Fengchun; MOURA, Scott J. Nonlinear predictive energy management of residential buildings with photovoltaics & batteries. **Journal of Power Sources** v. 325, p. 723–731 , 2016.

Vehicle Technologies Office Electric Vehicle Battery Pack Costs in 2022 Are Nearly 90% Lower than in 2008, according to DOE Estimates. **Office of Energy Efficiency & Renewable Energy**. January, 2023.

Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly>

WANG, Taoxiang *et al.* Determination of retirement points by using a multi-objective optimization to compromise the first and second life of electric vehicle batteries. **Journal of Cleaner Production** v. 275 , 2020.

WANG, Taoxiang; KANG, Lixia; LIU, Yongzhong. Multi-objective optimisation method for identifying retired points of electric vehicle batteries. **Chemical Engineering Transactions** v. 76, p. 925–930 , 2019.9788895608730.

WANG, Tiansi *et al.* Capacity-loss diagnostic and life-time prediction in lithium-ion batteries: Part 1. Development of a capacity-loss diagnostic method based on open-circuit voltage analysis. **Journal of Power Sources** v. 301, p. 187–193 , 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.110>>.

Wangsuphaphol, Aree, Surachai Chaitusaney, and Mohamed Salem. 2023. "A Techno-Economic Assessment of a Second-Life Battery and Photovoltaics Hybrid Power Source for Sustainable Electric Vehicle Home Charging" **Sustainability** 15, no. 7: 5866. <https://doi.org/10.3390/su15075866>

WU, Wei *et al.* Does energy storage provide a profitable second life for electric vehicle batteries? **Energy Economics** v. 92 , 2020.

XU, B., OUDALOV, A., ULBIG, A., ANDERSSON, G., & KIRSCHEN, D. S. (2016). Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 9(2), 1131-1140. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>

XU, Xiao *et al.* Study on the economic benefits of retired electric vehicle batteries

participating in the electricity markets. **Journal of Cleaner Production** v. 286, p. 125414 , mar. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125414>>.