

Ygor Ferreira Fabre

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ASSOCIAÇÃO DE
SUPERCAPACITORES COM BATERIAS DE
CHUMBO ÁCIDO PARA USO EM MICRORREDES**

Mestrado (Dissertação) apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Bauru - Unesp - Bauru.

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza

Coorientadora: Dra. Talita Mazon

**Bauru-SP
2022**

F123e

FABRE, YGOR FERREIRA

Estudo da viabilidade de associação de supercapacitores com baterias de chumbo ácido para uso em microrredes / YGOR FERREIRA FABRE. -- Bauru, 2022

80 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Prof. Dr. André Nunes Souza

Coorientadora: Dra. Talita Mazon

1. Baterias. 2. Supercapacitor. 3. Sistema Híbrido. 4. Armazenamento de Energia. 5. Microrrede. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE YGOR FERREIRA FABRE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 16 dias do mês de maio do ano de 2022, às 10:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de YGOR FERREIRA FABRE, intitulada **ESTUDO DA VIABILIDADE DE ASSOCIAÇÃO DE SUPERCAPACITORES COM BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO PARA USO EM MICRORREDES**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. SHIGEAKI LEITE DE LIMA (Participação Virtual) do(a) Engenharia da Computação / Universidade Federal do Maranhão - UFMA. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA

Dedico este trabalho ao meu primeiro Mestre, meu parceiro e eterno Pai, Zeu.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, nosso pai, que sempre iluminou o meu caminho. Aos meus pais, Zeu (in memorian) e Terezinha, e irmã Tábata, pelo amor e apoio em todas as fases da minha vida.

A minha querida esposa Karina, por estar sempre ao meu lado, alegrando-me e incentivando-me a superar os desafios que surgem.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Nunes de Souza pela confiança, paciência e profissionalismo durante a orientação deste trabalho.

A minha coorientadora Dra. Talita Mazon, pelo acompanhamento e efetiva participação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Pedro da Costa Junior e seus alunos estagiários que me ajudaram com a configuração inicial do trabalho no Latex.

Ao grupo de professores da Eletroeletrônica do SENAI Bauru, pela amizade, simpatia e as valiosas trocas de informações e ajuda nos ensaios.

A todos os gestores do SENAI-SP que passaram pela minha vida profissional e permitiram que pudesse investir tempo nesse estudo.

Ao companheiro de ensaios no laboratório LACEEL do SENAI Bauru, Wellington, que acreditou em nossa ideia e proporcionou a realização dos ensaios, sempre com muita paciência e dedicação.

Aos companheiros de pesquisa do laboratório LSISPOTI, pela amizade, parceria e disposição em ajudar sempre que necessário.

Ao amigo André Gifalli, do laboratório LSISPOTI, um agradecimento especial, pela parceria, paciência e ajuda desde o ingresso para o programa, ainda como aluno especial.

A todos os amigos e familiares que sempre torceram pelo meu sucesso profissional e desenvolvimento a minha carreira.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da FEB Faculdade de Engenharia de Bauru, que direta ou indiretamente contribuiu com a realização deste trabalho e proporciona o desenvolvimento de muitos pesquisadores.

“Só é útil o conhecimento que nos faz melhores.”
(Sócrates)

Resumo

Este estudo faz um levantamento de pesquisas recentes relacionadas aos tipos de sistemas de armazenamento de energia que podem ser utilizados em microrredes. Em especial, os conjuntos híbridos formados pela associação de baterias e supercapacitores considerados como promissores para essa aplicação. O uso de sistemas de armazenamento permite obter ganhos com a qualidade de energia, uma vez que podem ser utilizados para estabilizar o fluxo de potência, regular a frequência e a tensão da rede. Este trabalho apresenta as atuais tecnologias e as possíveis tendências envolvendo os tipos de baterias, os sistemas de controle e os conjuntos híbridos para armazenamento de energia. Sob essa tônica, a proposta do trabalho é verificar a viabilidade de um conjunto híbrido composto por bateria chumbo ácido e supercapacitores para aplicações em microrredes. Os ensaios foram realizados utilizando um equipamento de teste de vida ciclada e os resultados de carga/descarga e capacidade nominal das configurações são apresentados. A análise dos dados obtidos demonstrou que o conjunto híbrido bateria chumbo ácido e supercapacitores viabiliza a aplicação em microrredes, por colaborar de forma positiva para o aumento da capacidade nominal das baterias e conseqüentemente elevar a vida útil da bateria chumbo ácido.

Palavras-chave: Bateria. Supercapacitor. Sistema Híbrido. Armazenamento de Energia. Microrrede.

Abstract

This study surveys recent research related to the types of systems storage devices that can be used in microgrids. In particular, the hybrid sets formed by the association of batteries and supercapacitors considered as promising for this application. The use of storage systems makes it possible to obtain gains in energy quality, since they can be used to stabilize the power flow, regulate the frequency and voltage of the network. This work presents the current technologies and possible trends involving types of batteries, control systems and hybrid sets for energy storage. In this vein, the proposal of the work is to verify the feasibility of a hybrid set consisting of a lead battery acid and supercapacitors for microgrid applications. The tests were carried out using a cycled life tester and the charge/discharge results and rated capacity of the configurations are presented. The analysis of the data obtained demonstrated that the hybrid lead-acid battery and supercapacitors set enables the application in microgrids, for collaborating in a positive way to increase the capacity of the batteries and consequently increase the life of the lead acid battery.

Keywords: Battery. Supercapacitor. Hybrid System. Energy Storage. Microgrid.

Lista de Figuras

Figura 1 – Número de documentos publicados por ano (2005-2020).	26
Figura 2 – Número de documentos publicados por país (2005-2020).	26
Figura 3 – Potência instalada em sistemas de armazenamento.	27
Figura 4 – Projeção de capacidade de armazenamento de energia.	27
Figura 5 – Geração de energia nos EUA em 2018.	34
Figura 6 – Baterias em operação nos EUA em 2019.	34
Figura 7 – Geração de energia na Itália em 2017.	35
Figura 8 – Baterias em operação na Itália em 2019.	35
Figura 9 – Geração de energia no Japão em 2017.	36
Figura 10 – Baterias em operação no Japão em 2019.	36
Figura 11 – Geração de energia na Coreia do Sul em 2017.	37
Figura 12 – Baterias em operação na Coreia do Sul em 2019.	37
Figura 13 – Geração de energia na Austrália em 2018.	38
Figura 14 – Baterias em operação na Austrália em 2019.	38
Figura 15 – Geração de energia na China em 2018.	39
Figura 16 – Baterias em operação na China em 2019.	39
Figura 17 – Geração de energia na Alemanha em 2018.	40
Figura 18 – Baterias em operação na Alemanha em 2019.	40
Figura 19 – Geração de energia no Chile em 2018.	41
Figura 20 – Geração de energia no Brasil em 2018.	41
Figura 21 – Projeto híbridos com sistemas de armazenamento de energia.	42
Figura 22 – Estrutura dos supercapacitores.	50
Figura 23 – Sistema de gerenciamento de bateria.	51
Figura 24 – Bateria chumbo ácido.	55
Figura 25 – Banco de supercapacitores.	56
Figura 26 – Equipamento de teste de vida ciclada.	58
Figura 27 – Amostras durante o período dos ensaios laboratoriais.	59
Figura 28 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.	59
Figura 29 – Perfil de consumo 1.	62
Figura 30 – Perfil de consumo 2.	63
Figura 31 – Validação da capacidade nominal inicial.	66
Figura 32 – Resultados de capacidade nominal após 1º período de ciclos carga/descarga.	67
Figura 33 – Resultados de capacidade nominal após 2º período de ciclos carga/descarga.	68

Figura 34 – Resultados de capacidade nominal após 3º período de ciclos carga/descarga. 69

Figura 35 – Resultados de capacidade nominal após 4º período de ciclos carga/descarga. 70

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros para validação da capacidade nominal das amostras.	61
Tabela 2 – Perfil de consumo 1.	62
Tabela 3 – Perfil de consumo 2.	63
Tabela 4 – Validação da capacidade nominal inicial.	66
Tabela 5 – Resultados de capacidade nominal após 1 ^o período de ciclos carga/descarga.	67
Tabela 6 – Resultados de capacidade nominal após 2 ^o período de ciclos carga/descarga.	68
Tabela 7 – Resultados de capacidade nominal após 3 ^o período de ciclos carga/descarga.	69
Tabela 8 – Resultados de capacidade nominal após 4 ^o período de ciclos carga/descarga.	70

Lista de Abreviaturas e Siglas

BESS	Battery Energy Storage System
BMS	Battery Management System
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EDLC	Electrical Double Layer Capacitor
EE	Eficiência Energética
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
GTD	Geração Transmissão e Distribuição
HESS	Hybrid Energy Storage System
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia
MR	Microrredes
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RBC	Rede Brasileira de Calibração
SIN	Sistema Interligado Nacional
SoC	State of Charge

Lista de Símbolos

A	Ampere
Ah	Ampére hora
Pb	Chumbo
I	Corrente
F	Farad
GW	Gigawatt
joules	Joule
Li-S	Lítio-enxofre
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
kW	Quilowatt
C-rate	Taxa de carga e descarga
TWh	Terawatt hora
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt hora

Sumário

Lista de Abreviaturas e Siglas	17
Lista de Símbolos	19
1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Relevância e Motivação	23
1.2 Justificativa	25
1.3 Objetivos	28
1.4 Contribuições de pesquisa	28
1.5 Estrutura da dissertação	29
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 Microrredes	31
2.2 Fontes de energia e baterias aplicadas no mundo e no Brasil	33
2.3 Definições e conceitos sobre baterias	43
2.4 Baterias no planejamento da distribuição	44
2.5 Considerações finais sobre o capítulo	46
3 TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	47
3.1 Baterias	47
3.1.1 Baterias de íon lítio sem cobalto	47
3.1.2 Baterias de íon lítio de ânodo de silício	47
3.1.3 Baterias de íon lítio de estado sólido	48
3.1.4 Baterias de lítio enxofre	48
3.1.5 Baterias livres de metais pesados como níquel e cobalto	48
3.1.6 Baterias de grafeno	49
3.1.7 Baterias de íon sódio	49
3.2 Supercapacitores	49
3.3 Considerações finais sobre o capítulo	50
4 SISTEMAS DE CONTROLE E HÍBRIDO PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	51
4.1 Sistemas de gerenciamento BMS	51
4.2 Sistemas de gerenciamento de bateria Panasonic	52
4.3 Modulação assimétrica de temperatura	52
4.4 Sistema híbrido bateria e supercapacitor	52
4.5 Considerações finais sobre o capítulo	53
5 METODOLOGIA	55

5.1	Materiais	55
5.2	Descrição	56
5.3	Ensaios	57
5.3.1	Ensaio para validação de capacidade nominal	61
5.3.2	Ensaio de desempenho frente a ciclos de carga/descarga para aplica- ções fotovoltaicas	61
5.3.3	Ensaio de rotina	64
6	 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
6.1	Análise bateria chumbo ácido e supercapacitores	65
6.2	Análise da capacidade nominal antes do 1º período de ciclos carga/descarga .	66
6.3	Análise da capacidade nominal após 1º período de ciclos carga/descarga .	67
6.4	Análise da capacidade nominal após 2º período de ciclos carga/descarga .	68
6.5	Análise da capacidade nominal após 3º período de ciclos carga/descarga .	69
6.6	Análise da capacidade nominal após 4º período de ciclos carga/descarga .	70
6.7	Considerações finais sobre os resultados	71
7	 CONCLUSÃO	73
7.1	Aspectos gerais	73
7.2	Publicações aprovadas sobre a pesquisa	73
7.3	Continuidade para futuras pesquisas	74
	Referências	75

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados tópicos relevantes para o desenvolvimento desse trabalho, sendo eles: motivação, justificativa, objetivos e contribuições. Além disso, também é exposta, a estrutura dos capítulos da dissertação.

1.1 Relevância e Motivação

O desenvolvimento econômico mundial e o intenso consumo de recursos naturais resultam em um aumento considerável do consumo de energia elétrica. Ao longo dos próximos 20 anos, é esperado um crescimento de 30 % na demanda de energia pelo mundo (CASTRO E GUILHERME DANTAS, 2018). Somado a isso, existe uma grande preocupação com o futuro ambiental do mundo.

A sociedade atual, o ambiente comercial e industrial cada vez mais competitivos e até mesmo o trabalho em *home office* devido à pandemia, exigem que a energia elétrica tenha qualidade, confiabilidade e interrupções tendendo a zero. É possível dizer que a falta de energia para o mundo é uma condição que não pode acontecer.

Esse cenário fomenta a inserção de unidades geradoras próximas aos consumidores, conectadas aos sistemas de distribuição ou transmissão, caracterizando a Geração Distribuída (GD). O número de conexões tem crescido exponencialmente nos últimos anos e apresentado particularidades favoráveis ao desenvolvimento sustentável (SOETHE; BLANCHET, 2020).

Dessa forma, um conjunto de pequenas unidades geradoras, cargas e armazenadores de energia, denominado Microrredes (MR), desencadeia uma grande mudança no planejamento, operação e manutenção do sistema elétrico convencional. Para (JAVADIAN et al., 2013), a conexão de GD, pode acarretar: religamento não sincronizado do sistema, ilhamento indesejável, devido queima de fusíveis, atuação indevida do relé de proteção, contribuição para o nível de curto circuito, entre outros.

Nesta perspectiva, inúmeros estudos (BAJAY et al., 2018) vêm buscando novas soluções para o sistema elétrico. A implantação de GD e Eficiência Energética (EE) causam impactos positivos em diversos segmentos, entre eles: ambiental, econômico, social, técnico para o setor elétrico e na sociedade como um todo.

O uso de sistemas Fotovoltaico (FV) em GD está cada vez mais presente nas cidades, porém, grande parte do consumo residencial e comercial apresenta pico de demanda no período noturno, quando não há geração de energia através do FV, necessitando então da rede elétrica para suprir a demanda e isso prejudica a qualidade de energia. O armazenamento, entretanto, permite melhoria na qualidade de energia uma vez que as baterias podem ser utilizadas para estabilizar o fluxo de potência, regular a frequência e a tensão da rede (SOUZA; MARIANO; JUNIOR, 2020).

O chumbo (Pb) é utilizado pelo homem há mais de 5000 anos e atualmente é o sexto metal de maior utilização, com grande potencial para se manter nesse cenário, principalmente na utilização em baterias chumbo ácido. No Brasil não existe produção de chumbo primário, entretanto, toda a matéria prima para fabricação de baterias é oriunda de um processo solidificado de reciclagem e reutilização das sucatas (GOMES; HECK, 2018), o que torna essa tecnologia viável nos quesitos ambiental e financeiro. A partir dessa análise, a tecnologia chumbo ácido foi selecionada para a análise laboratorial realizada nesse trabalho.

A vida útil das baterias chumbo ácido sofre influência do regime de operação em que estão inseridas, por exemplo: os períodos de carga/descarga e níveis de temperatura. Assim, surge como alternativa para melhoria desse parâmetro, a inserção de supercapacitores, caracterizando um conjunto híbrido (bateria/supercapacitor). O supercapacitor pode fornecer altas correntes em uma condição de curto circuito em comparação as baterias chumbo ácido e (HENDERSON, 2020). Dessa forma, entende-se que a associação das duas tecnologias, é uma grande possibilidade de estudo.

O trabalho apresenta sistemas de gerenciamento e modos de controle em MR, a inserção das baterias no planejamento da distribuição, as principais tecnologias de armazenamento de energia e, então, são realizados os ensaios e apresentados resultados de um modelo de configuração híbrida entre bateria chumbo ácido e supercapacitor e outro só com bateria chumbo ácido demonstrando o comportamento em ciclos de carga/descarga.

Os resultados dos ensaios realizados demonstram que o conjunto híbrido bateria chumbo ácido e supercapacitores viabiliza a aplicação em MR, por colaborar de forma positiva para o aumento da capacidade nominal das baterias e conseqüentemente elevar a vida útil da bateria chumbo ácido.

1.2 Justificativa

O conceito de sistema elétrico convencional é formado por três elementos, sendo: geração, transmissão e distribuição. Na concepção, esse tipo de sistema permite que a eletricidade percorra um longo trajeto, em grande parte das condições, das unidades geradoras para unidades consumidoras, caracterizando, portanto, um sistema unidirecional.

O avanço das tecnologias envolvidas no sistema elétrico, necessidades de eficiência energética e proteção ambiental, tem feito esse sistema elétrico tradicional, Geração, Transmissão e Distribuição Geração Transmissão e Distribuição (GTD) passar por inúmeros desafios. Segundo (SILVESTRE et al., 2018), o conceito de transição energética pode ser definido por três pilares, conhecidos como 3D, os quais são: descarbonização, descentralização e digitalização. Essa nova topologia transforma o fluxo de potência unidirecional, em bidirecional.

Com o intuito de imersão ao estudo na área, nesta dissertação foi desenvolvido, um estudo bibliométrico que possibilitou analisar o desenvolvimento de pesquisas sobre o tema e elencar os principais trabalhos e autores para realização de uma fundamentação teórica consistente.

A partir dos descritores *microgrid*, *energy storage* e *battery* utilizados como filtro nesta pesquisa, foram encontrados 2.863 documentos relacionados com o tema nessa configuração de pesquisa. Na Figura 1, foi ilustrado a quantidade de publicações por ano no período de 2005 a 2020.

É possível observar que houve um aumento consistente no número de publicações ao longo do período de estudo, com isso verifica-se que essa dissertação está alinhada com os estudos desenvolvidos nessa área e pode contribuir para o desenvolvimento tecnológico do tema (YGOR FERREIRA FABRE, 2021).

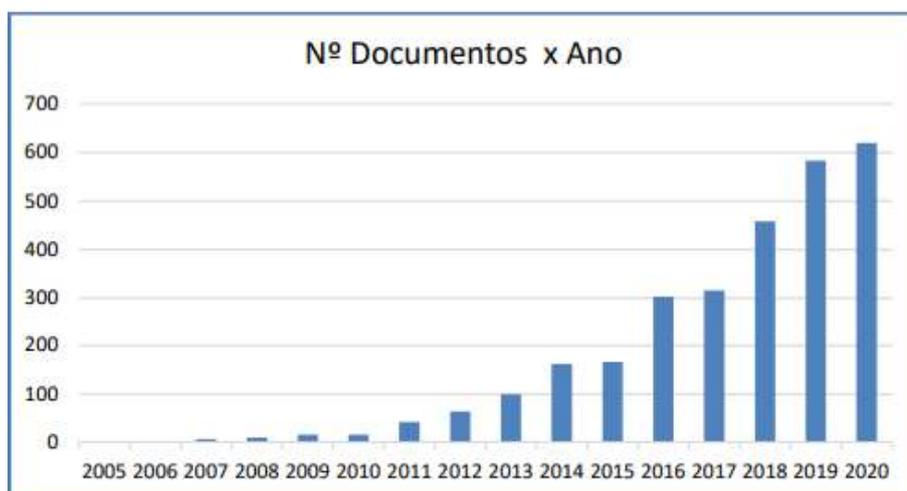


Figura 1 – Número de documentos publicados por ano (2005-2020).

Fonte: Retirado de (YGOR FERREIRA FABRE, 2021).

Na Figura 2, foi ilustrado a quantidade de publicações no período de 2005 a 2020 por país de origem da pesquisa. Nota-se nesse período, que o Brasil publicou aproximadamente 100 documentos, a China apresentou mais de 600 publicações, os Estados Unidos mais de 400 e a Índia com publicações acima de 300 documentos.

Esse número inferior de publicações relacionadas ao tema, defasa o Brasil de grandes potências mundiais e inevitavelmente torna a tecnologia financeiramente menos acessível, devido a impostos e taxas de importações.

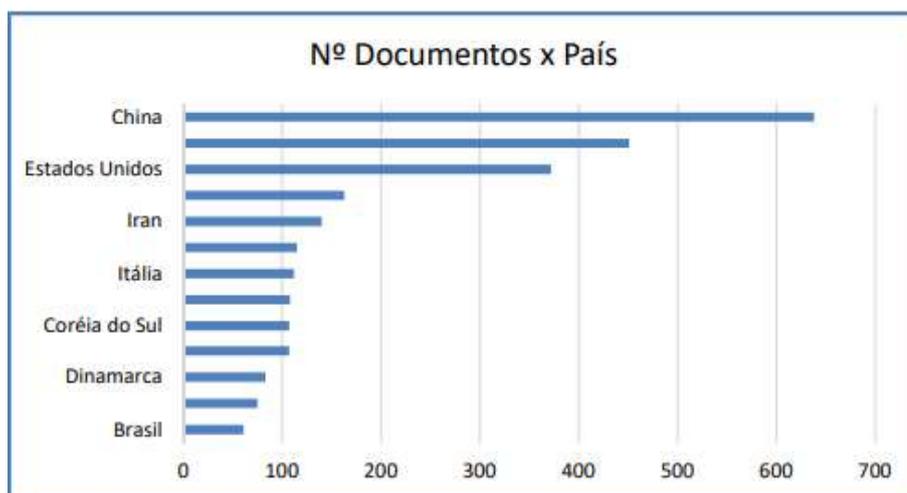


Figura 2 – Número de documentos publicados por país (2005-2020).

Fonte: Retirado de (YGOR FERREIRA FABRE, 2021).

Na Figura 3 foi ilustrado o aumento significativo de potência instalada de sistemas de armazenamento de energia a cada ano. É possível observar um crescimento acima de 600 % no período de 2006 a 2016, atingindo cerca de 1,7 GW em 2016.

Nota-se de forma específica que nos Estados Unidos, Coreia do Sul e Japão representam 60 % da potência instalada em sistemas de armazenamento de energia no mundo até o ano de 2016 (VIAN et al., 2021).

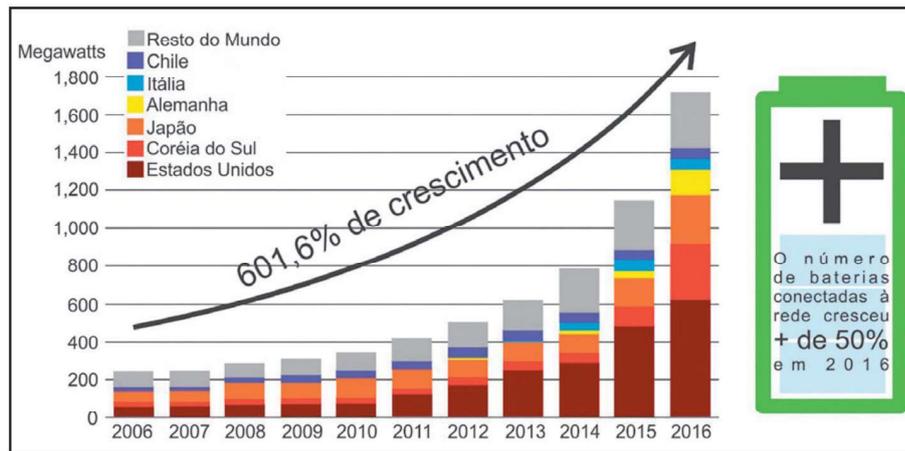


Figura 3 – Potência instalada em sistemas de armazenamento.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na Figura 4 foi ilustrado que a curva de crescimento do uso de baterias é acentuada, considerando o período entre 2016 e 2030, partindo da ordem de 2 GW para 300 GW (VIAN et al., 2021).

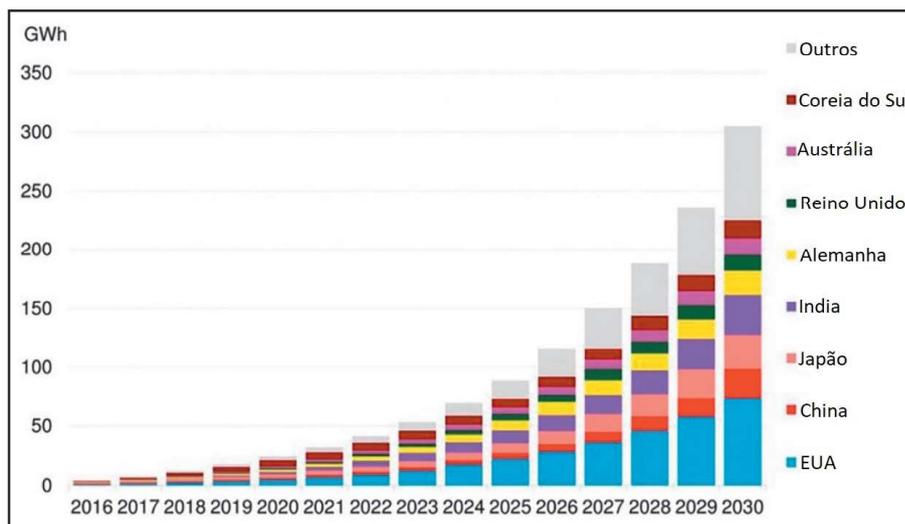


Figura 4 – Projeção de capacidade de armazenamento de energia.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

1.3 Objetivos

Estudar a viabilidade de aplicação de uma associação de bateria chumbo ácido e supercapacitores em sistemas caracterizados como MR. Logo, para o desenvolvimento da dissertação foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar revisão bibliográfica relacionada ao tema da dissertação;
- Estudar os tipos de sistemas de armazenamento de energia;
- Estudar as tecnologias de sistemas de armazenamento de energia mais empregadas em MR; e
- Realizar ensaios laboratoriais em sistemas de armazenamento de energia híbrido entre bateria chumbo ácido e supercapacitor.

1.4 Contribuições de pesquisa

O foco desta pesquisa consiste na elaboração das seguintes análises:

- Viabilidade de aplicação em MR para uma associação de supercapacitores com baterias chumbo ácido;
- Influência dos sistemas de armazenamento de energia para elevar o índice de aproveitamento de recursos naturais existentes atualmente; e
- Possibilidade de aplicação de outras tecnologias de baterias na configuração híbrida apresentada com supercapacitor.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2: neste capítulo é apresentada uma breve fundamentação teórica sobre os conceitos de MR, bem como as aplicações desses sistemas no Brasil e no mundo. Além disso, é dissertado sobre a evolução das baterias e suas definições;
- Capítulo 3: apresenta-se neste capítulo as principais tecnologias de armazenamento de energia discutidas atualmente;
- Capítulo 4: este capítulo é dedicado para apresentar sistemas de controle e híbrido referentes as tecnologias de armazenamento de energia estudados;
- Capítulo 5: este capítulo consiste em apresentar de forma detalhada a metodologia utilizada neste trabalho para avaliação do comportamento dos dispositivos de armazenamento de energia propostos;
- Capítulo 6: expõem os dados obtidos através da metodologia apresentada no capítulo anterior, bem como análises dos resultados para validação; e
- Capítulo 7: São apresentadas as conclusões finais e possíveis diretrizes para realização de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica sobre os conceitos de MR, bem como as aplicações desses sistemas no Brasil e no mundo. Além disso, é dissertado sobre a evolução dos sistemas de armazenamento de energia e suas principais definições.

2.1 Microrredes

Uma MR pode integrar efetivamente várias fontes de GD, especialmente fontes de energia renováveis. O sistema autônomo, que pode ser composto por energia eólica, solar, armazenamento de energia é uma MR autônoma típica, em que as gerações de energia eólica e solar são os sistemas intermitentes com dinâmica complexa e múltiplas restrições. A otimização coordenada entre esses tipos de gerações de energia ou ainda, outras fontes de energia, podem efetivamente atender à demanda de carga, reduzir o desgaste das unidades geradoras, prolongar a vida útil e, assim, garantir a segurança do sistema elétrico.

Nesse contexto, tendo em vista o uso de sistemas de armazenamento auxiliares de suprimento de energia, a tecnologia de armazenamento de energia em bateria Battery Energy Storage System (BESS), (MILLER et al., 1996) afirma que ela tem potencial para prover benefícios que garantam a qualidade da tensão e diminuições das interrupções no fornecimento. O uso do sistema de armazenamento de energia pode contribuir para melhoria da qualidade do produto sob a forma de redução de subtensões, regulação de frequência, estabilização da rede de distribuição, minimização das perdas, entre outros, seja nos sistemas isolados ou interligados.

Para (LAWDER et al., 2014), a ineficiência da rede elétrica (desperdício de energia) se deve a imprevisibilidade existente entre a quantidade de energia exigida pelo consumidor e a produzida nas fontes de geração, isto é, no sistema convencional unidirecional, as usinas produzem mais energia que o necessário de modo a garantir a demanda da população, no entanto, afirmam que muitas dessas ineficiências podem ser eliminadas com uso do BESS.

No Brasil, a qualidade da energia na distribuição é regulamentada pelo procedimento (PROCEDIMENTOS. . . , 2022) (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017), observados a qualidade do produto (variações da tensão e frequência, harmônicas, fator de potência, entre outros) e a qualidade do serviço prestado (tempo de fornecimento e tempo de atendimento as correções). A curto e médio prazos, os ganhos com eficiência energética podem trazer efeitos tarifários indesejáveis, porém, a longo prazo

a conservação de energia deve ser fundamental para: postergar investimentos em geração, definir padrões de consumo mais sustentáveis com os recursos do planeta e ainda, substituir, em grande parte, geração em usinas termelétricas (BAJAY et al., 2018). (SÉRGIO BAJAY e colab., 2018).

Em (DIVYA; ØSTERGAARD, 2009) são mostradas várias aplicações em sistemas elétricos comerciais ao redor do mundo e utilizam diferentes tecnologias de baterias (não híbrida) variando entre 300 kW e 64 MW, sendo possível conhecer a estimativa de ciclagem dos tipos de baterias empregadas, entre essas as baterias chumbo-ácidas que podem variar entre 1000 e 2000 ciclos para tipo ventilada, ou 200 e 300 ciclos para selada. Devido à maturidade do desenvolvimento da bateria chumbo ácido, esse tipo é o mais empregado em sistemas de armazenamento, segundo (CHEN et al., 2009).

Contudo, como a vida útil está ligada à ciclagem, estender a vida útil por meio da redução dos stress de carga e descarga de alta frequência com a tecnologia híbrida envolvendo supercapacitores (CHAIRES et al., 2016), pode ser uma forma de aumentar a segurança do sistema quando solicitado e, assim preservar a qualidade de energia do produto dentro nos limites regulatórios.

Além disso, com o rápido desenvolvimento e crescimento da geração de energia renovável intermitente, torna indispensável a identificação de oportunidades de investimento em armazenamento de energia e o estabelecimento de sua rentabilidade com garantias de fornecimento de energia de qualidade.

2.2 Fontes de energia e baterias aplicadas no mundo e no Brasil

No Brasil, o parque de GD vem evoluindo de forma mais lenta comparado ao desenvolvimento mundial, que já atingiu cerca de 160 GW de potência instalada. Um estudo recente, elaborado pela *Navigants*, projeta que a geração distribuída atingirá 345 GW de potência instalada em 2028 (SILVERSTEIN, 2019). Uma motivação desse aumento de instalações é a redução do custo de energia gerada pelas fontes alternativas.

O custo da energia produzida pelas eólicas nos Estados Unidos alcançou 45 US\$/MWh em 2017, o que representa uma redução de cerca de 65 % em relação ao valor de 2009, de 140 dólares. A maior redução em termos de valor ocorreu no caso da energia gerada a partir das usinas solares, que em 2009 era pouco mais de 350 US\$/MWh e em 2017 chegou a 50 US\$/MWh. Uma redução de mais de 300 dólares, ou cerca de 85 %, em apenas 8 anos (BERKE, 2018).

Os sistemas isolados são os sistemas de energia elétrica que não estão conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), existem atualmente 246 localidades isoladas no Brasil, sendo a maior parte situada na região norte, nos estados de Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Pará, Rondônia, Roraima, além da ilha de Fernando de Noronha, em Pernambuco, e algumas localidades de Mato Grosso (ONS, 2019).

A demanda por energia, em locais com dificuldades de acesso e precariedade no sistema, é suprida na maior parte por geradores térmicos a óleo diesel, refletindo portanto, em ao menos dois quesitos desfavoráveis, são eles: custo benefício e degradação do meio ambiente. Sendo assim, as maiores experiências relacionadas com as MR no país, estão sendo desenvolvidas como alternativas no suprimento da demanda nesses locais. O estudo realizado (VIAN et al., 2021) apresenta um retrato do cenário mundial, referente as fontes de energia e baterias mais utilizadas.

Na Figura 5 foi ilustrado o cenário de 2018 das fontes de energia encontradas nos EUA e é possível observar que o país atingiu 4178 TWh de geração total de energia, representando, portanto, uma grande fatia da capacidade energética do mundo. O fornecimento é majoritariamente termelétrico, com representatividade de 83 %.

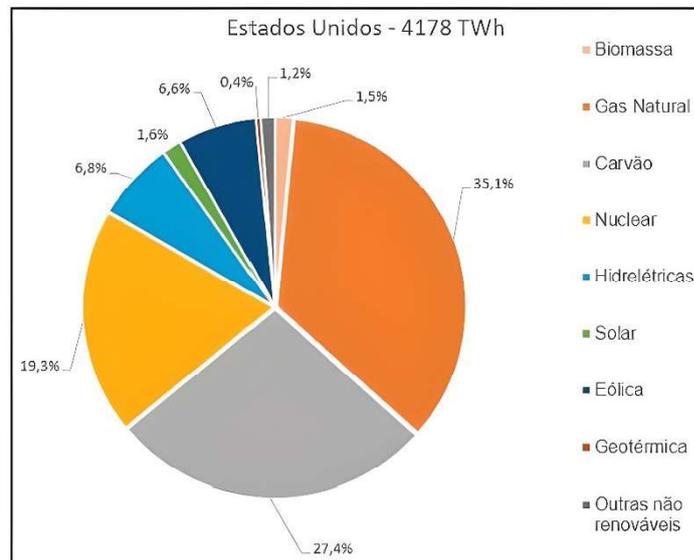


Figura 5 – Geração de energia nos EUA em 2018.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Foi apresentado na Figura 6, a predominância de sistemas de armazenamento de energia tem origem da tecnologia lítio nos EUA, totalizando 195 unidades instaladas e refletindo 80 % do cenário mundial.

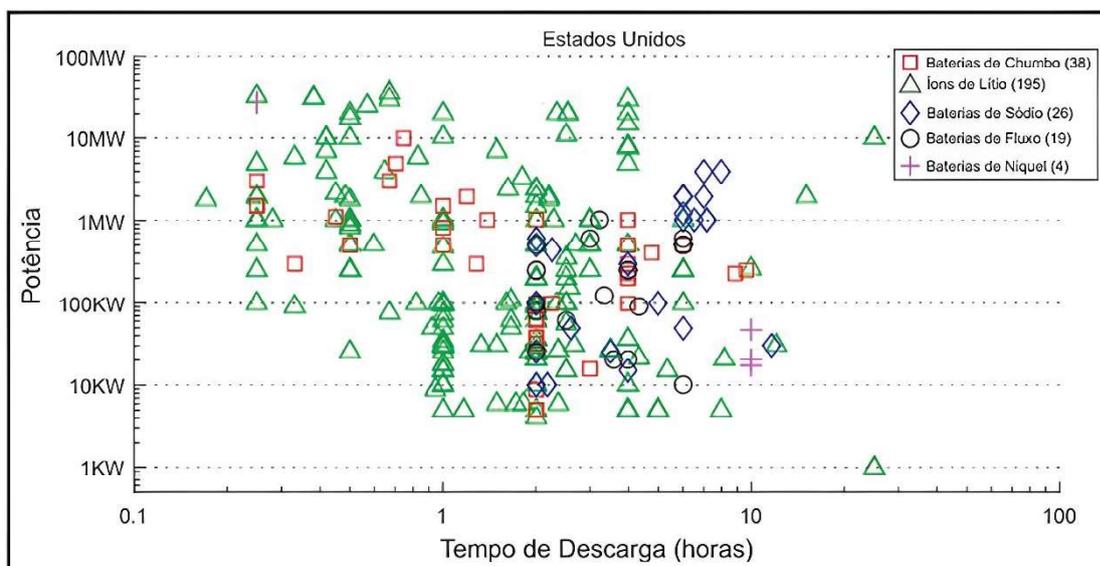


Figura 6 – Baterias em operação nos EUA em 2019.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na Figura 7 foi apresentado os percentuais das fontes de energia na geração de eletricidade na Itália em 2017. A Itália, é reconhecida como pioneira na substituição de medidores de energia convencionais por medidores inteligentes, todavia, o gás natural é a principal fonte de energia do país.

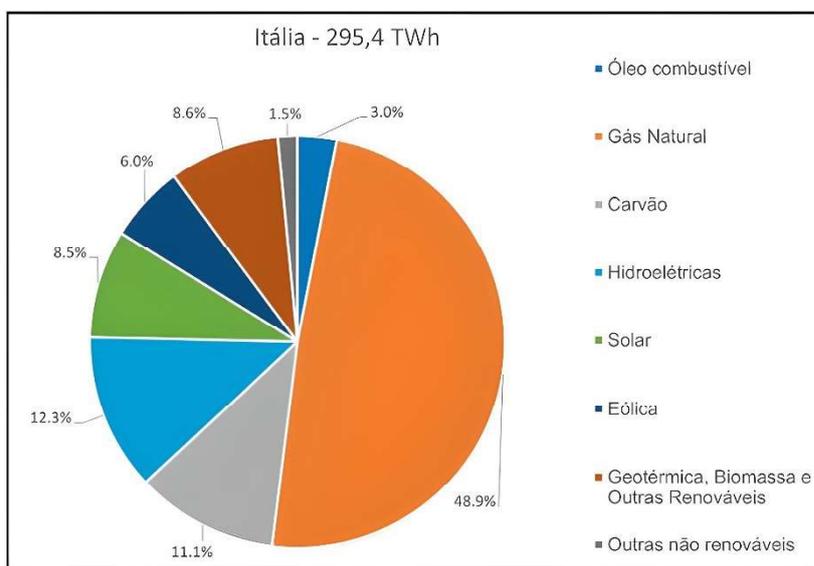


Figura 7 – Geração de energia na Itália em 2017.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na Figura 8 foi ilustrado a aplicação de sistemas de armazenamento de energia na Itália. É possível verificar a predominância da tecnologia de lítio.

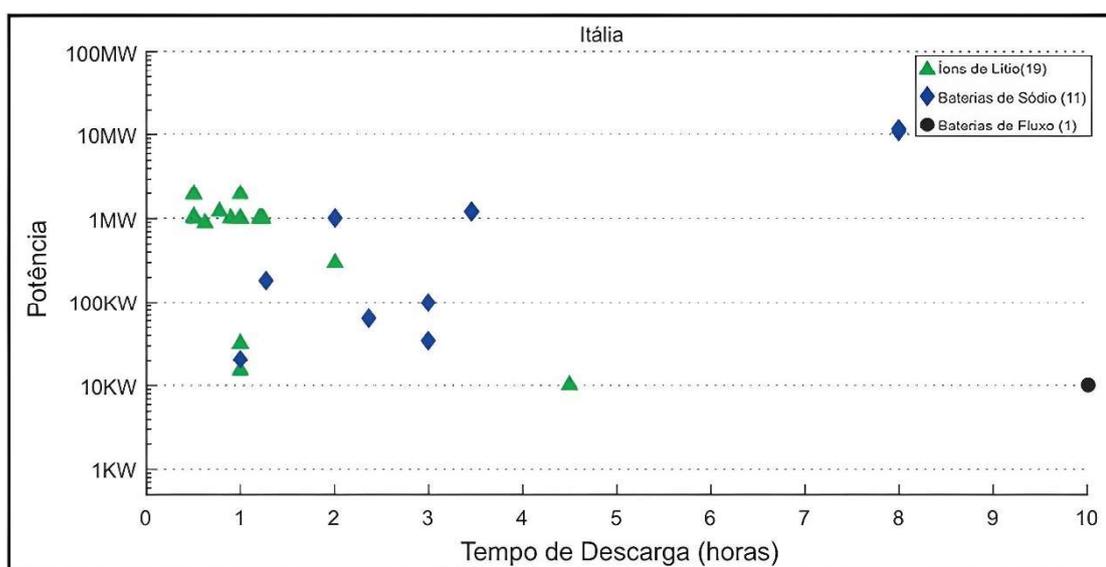


Figura 8 – Baterias em operação na Itália em 2019.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

O Japão, sempre reconhecido pela energia nuclear, vem evoluindo e atualizando sua estratégia referente ao potencial energético do país após o acidente de Fukushima. A geração renovável, por exemplo, está na ordem de 17 %, conforme ilustrado na Figura 9.

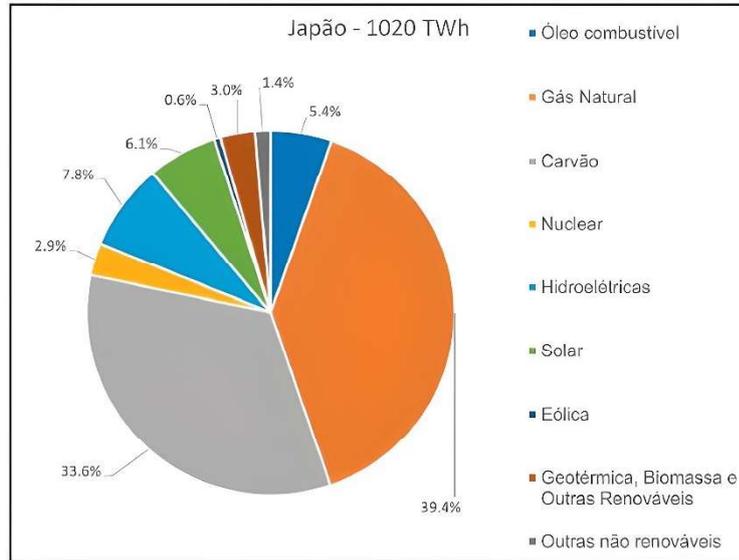


Figura 9 – Geração de energia no Japão em 2017.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na Figura 10 foi ilustrado os sistemas de armazenamento de energia no Japão. A bateria de sódio sódio se destaca, pela potência acima de 1 MW e tempo de descarga superiores a 6 horas, utilizados geralmente para realizar corte de consumo no horário de ponta.

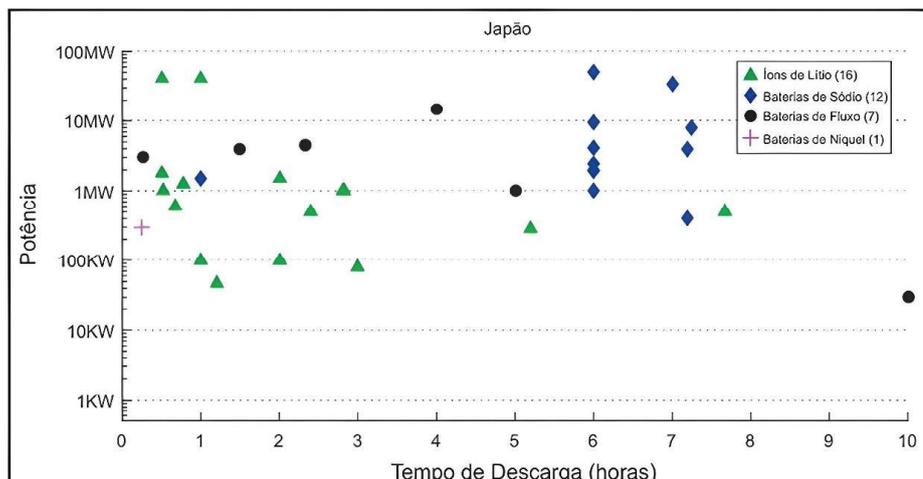


Figura 10 – Baterias em operação no Japão em 2019.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

O potencial energético da Coreia do Sul no ano de 2017 é ilustrado na Figura 11 sendo possível verificar que majoritariamente se destacam as termoelétricas. A energia renovável é quase que insignificante comparado ao cenário total do país.

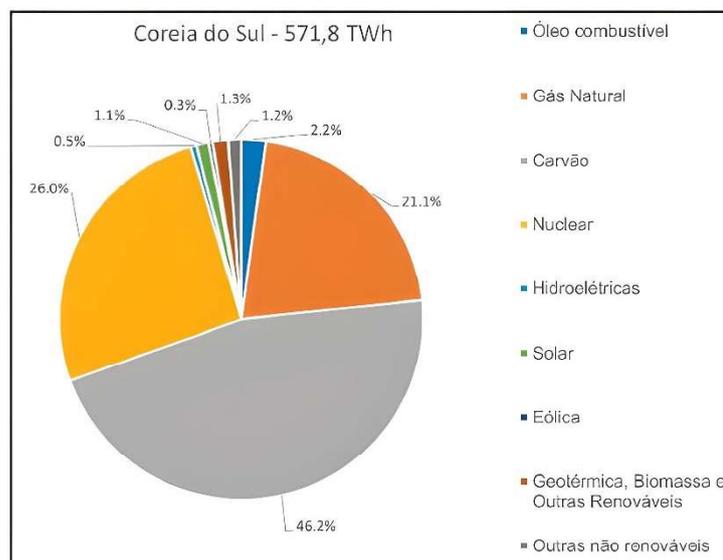


Figura 11 – Geração de energia na Coreia do Sul em 2017.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

A predominância de baterias de lítio na Coreia do Sul foi ilustrada na Figura 12, principalmente em potências superiores a 200 kW e duração de poucas horas.

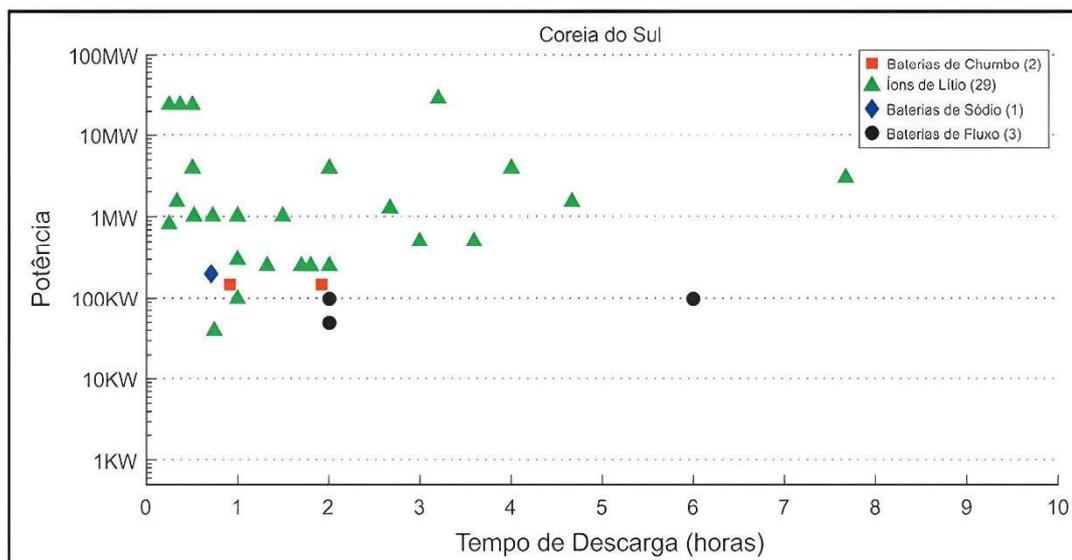


Figura 12 – Baterias em operação na Coreia do Sul em 2019.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na China, fica evidente na Figura 15, que a predominância energética está na utilização de termelétricas, seguido pelas hidrelétricas. Essas duas fontes representam cerca de 88 % do potencial de energia do país.

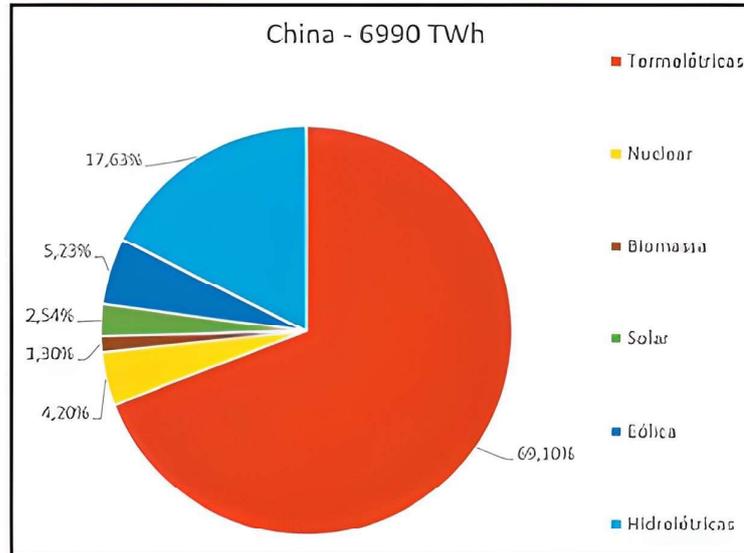


Figura 15 – Geração de energia na China em 2018.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na Figura 16 foi ilustrado o cenário de baterias instaladas na China, na qual cerca de 85 % são lítio, com predominância de duração inferior a 4 horas.

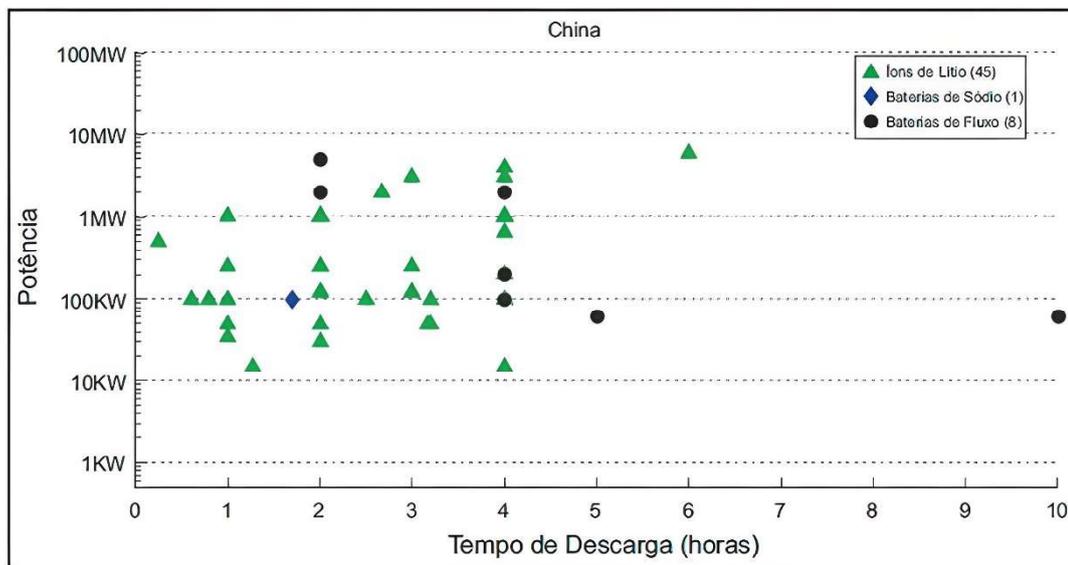


Figura 16 – Baterias em operação na China em 2019.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na Alemanha, foi possível identificar um cenário interessante na Figura 17. A predominância de utilização de termelétricas ainda é evidente, porém também se verifica grande potencial de energias renováveis, cerca de 27 % entre energia eólica e solar.

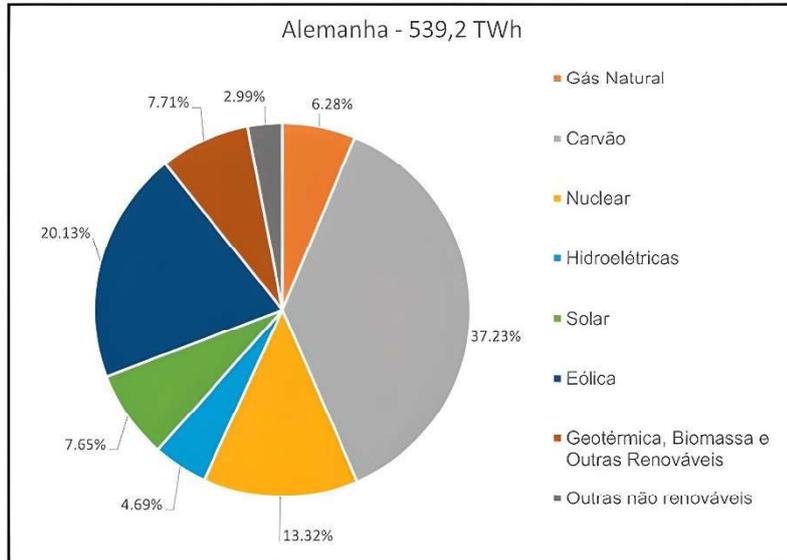


Figura 17 – Geração de energia na Alemanha em 2018.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Além desse crescimento acentuado de energias renováveis, foi verificado na Figura 18, grande utilização de baterias no país, com predominância da tecnologia lítio, especialmente em aplicações de baixa duração.

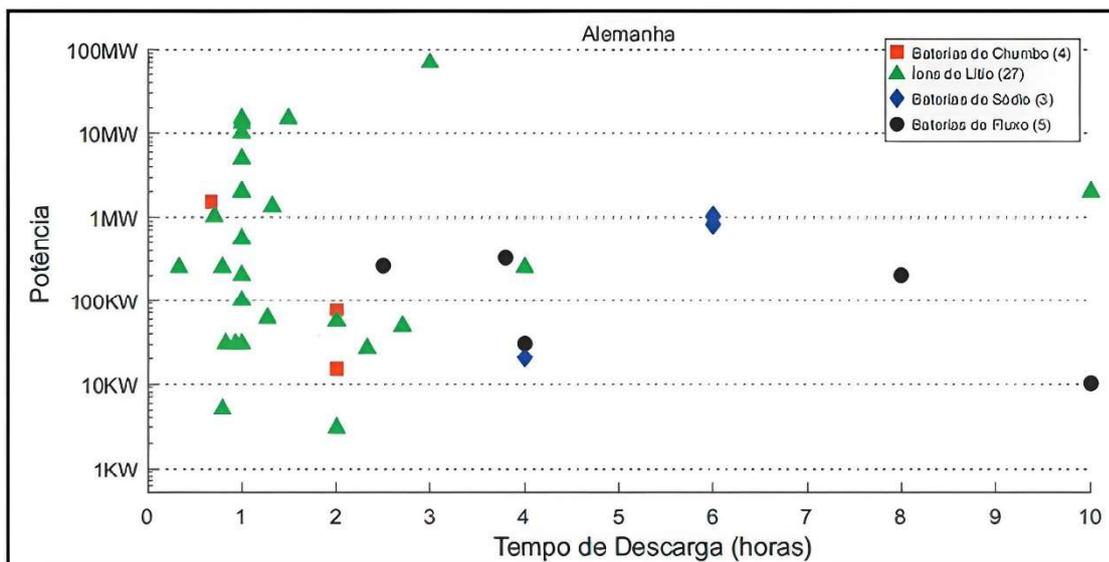


Figura 18 – Baterias em operação na Alemanha em 2019.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

No cenário latino-americano, foi verificado na Figura 19 que o Chile tem destaque predominante nas termelétricas e hidrelétricas, que juntas, representam cerca de 87 % de fontes energéticas do país. A aplicação de energias renováveis, solar e eólica, estão por volta de 12 % no país. O armazenamento de energia no país, ainda possui potencial discreto.

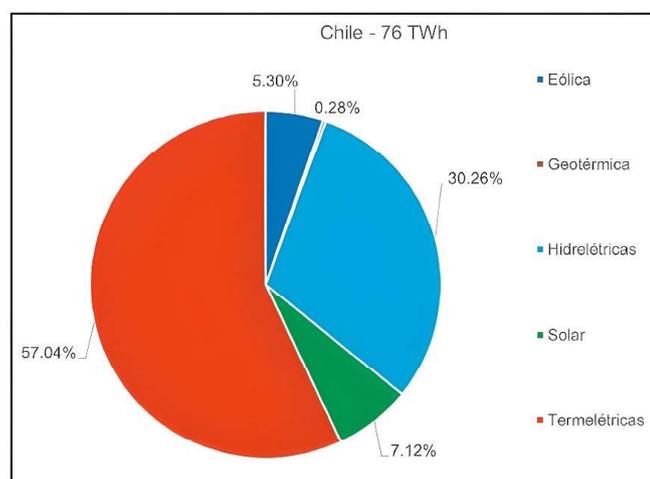


Figura 19 – Geração de energia no Chile em 2018.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

O Brasil, possui predominantemente potencial energético voltado para hidrelétricas, como ilustrado na Figura 20. O cenário hídrico do país e do mundo, contudo, preocupa para os próximos anos e isso provavelmente é o principal motivo do aumento da aplicação de outras fontes renováveis, solar e eólica, por exemplo. A instalação de sistemas de armazenamento de energia está em estágios anteriores de países citados anteriormente.

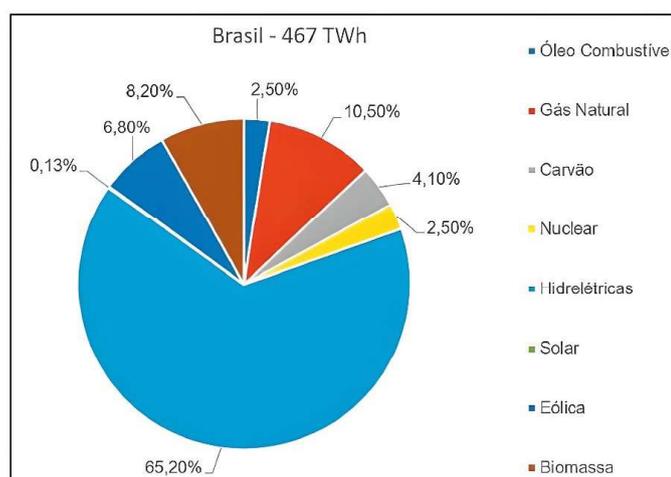


Figura 20 – Geração de energia no Brasil em 2018.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

Na Figura 21, é possível fazer uma análise do cenário de projetos híbridos, envolvendo fontes de energia renováveis e sistemas de armazenamento. Esse conceito de projeto é uma grande oportunidade de elevar o aproveitamento de cada fonte de energia.

Os Estados Unidos se destacam com o maior número de projetos híbridos, 49 projetos no total, seguido pela Austrália com 15 projetos. É importante analisar quem em projetos híbridos, o sistema de armazenamento, podem ter como objetivo regulação de frequência, aumento de capacidade ou confiabilidade de rede elétrica.

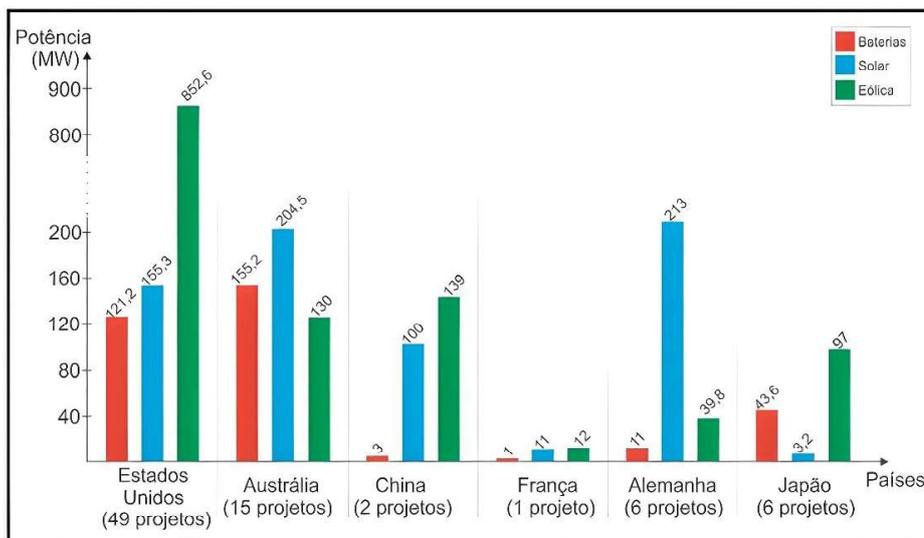


Figura 21 – Projeto híbridos com sistemas de armazenamento de energia.

Fonte: Retirado de (VIAN et al., 2021).

O cenário mundial em armazenamento de energia apresentado em (VIAN et al., 2021) demonstra que a tecnologia íon lítio possui destaque em diversos países. No entanto, essa tecnologia apresenta como desvantagens: trâmites de importação, falta de normatização, custo mais elevado, maturidade tecnológica, dificultando portanto, o uso em MR no Brasil, principalmente se considerarmos que a demanda atualmente são em estados como Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Pará, Rondônia e Roraima que apresentam desenvolvimento econômico inferior aos grandes centros do país.

Dessa forma, para essa dissertação, a bateria chumbo ácido tornou-se a tecnologia a ser estudada, uma vez que apresenta justamente o cenário oposto ao citado anteriormente.

2.3 Definições e conceitos sobre baterias

Neste tópico foi apresentada algumas definições e conceitos (ALHAMALI et al., 2016) relativos a baterias, em complemento ao que foi citado.

- **Capacidade:** termo utilizado para quantificar a carga elétrica que pode ser armazenada pela bateria. A capacidade é dada em Ah, que é obtido pelo produto da corrente em Ampère pelo tempo de descarga, em horas. A integral da corrente (i) de descarga, do momento inicial em que a bateria está carregada até o tempo (t) igual a zero, onde a tensão atinge um valor considerado mínimo de descarga, com tempo igual a (t) define a unidade de medida Ah. A capacidade da bateria é obtida pela expressão 1:

$$C = \int_0^t i(t)dt \quad (1)$$

- **Potência e Energia nominal:** as baterias eletroquímicas são formadas por células. cada célula de uma bateria apresenta valores nominais de tensão e capacidade. Portanto, configurações em série e paralelo dessas células, determinam respectivamente a capacidade e a tensão de uma bateria. A relação de potência e energia de um elemento de armazenamento também é importante, pois define o período de carga/descarga do sistema aplicado.
- **Taxa de carga e descarga *C-rate*:** a relação entre potência e capacidade da bateria define a taxa de velocidade de carga e descarga, expressa pelo termo *C-rate*. Por exemplo: uma bateria de 360 W, em 1 hora teria *C-rate* igual a 1. Se operasse em uma taxa *C-rate* igual a 2, a potência da bateria seria de 720 W e a duração de 30 minutos. A taxa *C-rate* varia em função da tecnologia das baterias e pode alcançar valores superiores a 4, com auxílio de resfriamento, para não aumentar degradação das baterias. O *C-rate* é obtido pela expressão 2:

$$C - rate = \frac{\text{Potência Nominal (W)}}{\text{Energia (Wh)}} \quad (2)$$

- **Potência:** a potência da bateria varia de acordo com a taxa *C-rate* e utilizada na configuração aplicada, já a energia da bateria é dada pela composição e associações das células de cada bateria, conforme já expresso anteriormente. *C-rate* mais altos, podem ser utilizados para regulação de frequência, pois permite injetar altos valores de potência em curtos períodos de tempo;
- **Estado de carga e estado de saúde:** para determinação do estado de saúde de uma bateria, considera-se três critérios, sendo: capacidade, resistência interna e auto

descarga. O estado de carga define a quantidade de energia que está armazenada na bateria sendo expresso em percentual através da expressão 3:

$$\text{Estado de carga} = \frac{\text{Quantidade de carga da bateria}}{\text{Capacidade total da bateria}} \quad (3)$$

- **Tempo de resposta:** período de tempo existente entre o momento de demanda de energia da carga, até o momento de início de descarga. Algumas aplicações exigem tempos de respostas muito curtos, caso de redes elétricas hospitalares por exemplo;
- **Efeito memória:** a bateria gradativamente perde a capacidade de recarga, após seguidas descargas parciais, esse efeito recebe a denominação efeito memória. Essa característica se deve à redução da tensão na qual a bateria opera, sendo muito conhecido, por exemplo em baterias de níquel cadmio e níquel metal hidreto (SASAKI; UKYO; NOVÁK, 2013).
- **Auto descarga:** a auto descarga é uma característica presente em todas as baterias, sendo o processo de descarga de uma bateria que não esteja em utilização. Esse fenômeno, que é permanente e não pode ser revertido, está ligado mais às características eletroquímicas do que ao regime de funcionamento da bateria. As baterias chumbo ácido apresentam baixas taxas de auto descarga (UNIVERSITY, 2021); e
- **Envelhecimento:** essa característica da bateria acontece devido a alterações químicas e físicas que nela ocorrem no decorrer natural de vida útil. O envelhecimento é função da tecnologia e geralmente é motivado pela sua idade e pelo regime de operação durante o tempo (ciclos de carga/descarga) (MAHESHWARI, 2018).

2.4 Baterias no planejamento da distribuição

O uso de baterias no planejamento da distribuição de energia elétrica é um tema em constante revisão, tendo em vista o surgimento de novos tipos de demandas e tecnologias.

Em (EHSAN; YANG, 2018) é proposto um modelo de planejamento de rede de distribuição ativa estocástica baseado em cenários, considerando a GD de múltiplos tipos e armazenamento de energia de bateria. A solução proposta visa identificar a combinação ideal, localização e dimensionamento de unidades de turbina eólica, fotovoltaica e armazenamento de energia de bateria para maximizar os lucros da operadora de rede de distribuição. O desempenho do modelo proposto é comparado com o modelo de planejamento determinístico, e uma análise de sensibilidade é realizada para avaliar o impacto de vários fatores de planejamento na solução.

Embora unidades de armazenamento de energia possam ser instaladas e gerenciadas para prover a necessidade de várias unidades residenciais, a solução com unidades de armazenamento individuais pode ser viável. Em (BYRNE; VERBIC, 2013) é apresentado uma metodologia, resultados e análise da viabilidade do armazenamento de energia residencial para arbitragem de energia no contexto do mercado varejista australiano de eletricidade.

A viabilidade econômica desse tipo de armazenamento é determinada por sua capacidade em obter economia de custos residenciais com a arbitragem de energia, que é: a implementação de um sistema de bateria para comprar, armazenar e descarregar energia elétrica para aproveitar a flutuação dos preços da eletricidade. Parte integrante desta simulação foi a incorporação da estocasticidade da demanda de eletricidade por hora de uma residência, que é amplamente determinada pelo comportamento do consumidor. Geralmente, muitas das configurações de armazenamento examinadas mostraram altas probabilidades de serem economicamente viáveis nos atuais contextos econômicos e técnicos.

Muitos estudos são publicados para mitigar a flutuação da saída de painéis fotovoltaicos usando baterias, especialmente, sob a operação de ilhamento da MR que causa a instabilidade do sistema. Embora as baterias sejam usadas para mitigar esse problema, um atraso no seu controle afeta fortemente a frequência e a amplitude da tensão da MR. Geralmente, há um atraso de controle, visto que a saída do painel fotovoltaico é medida em cada período discreto designado e o sinal de controle é enviado para as baterias após o cálculo da diferença entre a carga e a saída de energia.

Para reduzir as influências desse retardo de tempo, (HASHIMOTO et al., 2019) propôs o chamado "sistema fotovoltaico com baterias híbridas" que possui baterias no lado Corrente Alternada (CA) (rede) e no lado Corrente Contínua (CC). Neste sistema, visto que a bateria do lado CC absorve apenas a flutuação de energia causada pelo atraso de controle da bateria do lado CA, a capacidade da bateria do lado CC pode ser pequena.

Além das estratégias de uso das baterias, pesquisadores do mundo inteiro procuram melhorar a composição química dos diversos tipos de baterias visando minimizar os pontos fracos de cada combinação. Com este objetivo, em (NANDA; BHARGAV; MANTHIRAM, 2020) descobriu-se que a introdução de telúrio no sistema lítio enxofre (Li-S) como um aditivo de cátodo melhora significativamente a reversibilidade do revestimento e decaimento de lítio, proporcionando uma melhoria notável na reciclabilidade.

Contudo, com a mudança na composição química se faz necessário avaliar o impacto ambiental e nas relações com o trabalho. Como exemplo, por décadas pesquisadores busca-

ram maneiras de eliminar cobalto das baterias de alta energia que alimentam dispositivos eletrônicos, devido ao alto custo e às ramificações de direitos humanos da mineração, isto levou ao desenvolvimento de soluções como o uso de alto teor de níquel associado a outros metais (LI; LEE; MANTHIRAM, 2020).

2.5 Considerações finais sobre o capítulo

A crise energética é uma realidade e o mundo precisa de novas fontes de energia. Verifica-se a necessidade de evolução para a utilização de energias renováveis, são inúmeras as possibilidades de utilizar o meio ambiente para esse propósito. Além disso, existe a necessidade de desenvolvimento de estudos a respeito de tecnologias e sistemas de armazenamento de energia. No Capítulo 3 apresentam-se as principais tecnologias de armazenamento de energia, estudadas atualmente.

3 TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Nota-se na literatura um volume significativo de tecnologias de armazenamento de energia (HALL, 2021) como: baterias e supercapacitores. Dentre as baterias, as baterias de fluxo líquido propostas por cientistas de *Stanford* (GOLDEN, 2018), bateria de íon carbono desenvolvidas pela empresa ZapGo's (ZAPGO'S . . . , 2019), baterias de zinco-argônio (WEI et al., 2017), baterias de grafeno com "bolas de grafeno"(SON et al., 2017), e baterias de escoamento de óxido de vanádio (ADELEKE; UKIL; ZHANG, 2019) têm sido consideradas promissoras no armazenamento de energia.

3.1 Bateriais

3.1.1 Baterias de íon lítio sem cobalto

Pesquisadores da Universidade do Texas (LI; LEE; MANTHIRAM, 2020) desenvolveram uma bateria de íon de lítio sem a presença de cobalto no cátodo. No caso, o cobalto foi substituído por níquel em elevadas concentrações (89 %) usando manganês e alumínio para os outros componentes do sistema. Isto é uma grande vantagem, pois o cobalto é o componente menos abundante e mais caro nos cátodos de baterias. A solução desenvolvida proporcionou um aumento no tempo de vida útil da bateria e melhor desempenho, visto que a distribuição dos íons nos eletrodos ocorre de forma mais homogênea.

Paralelamente, a empresa chinesa SVOLT (STAFF, 2020), anunciou que fabricou baterias sem cobalto projetadas para o mercado de carros elétricos. Além de reduzir os metais de terras raras, a empresa alega que as novas baterias apresentam densidade de energia maior, o que poderia resultar em autonomias de até 800 Km (500 milhas) para carros elétricos, ao mesmo tempo, prolongando a vida útil da bateria e aumentando a segurança.

3.1.2 Baterias de íon lítio de ânodo de silício

Este tipo alternativo de bateria de íon lítio usa silício nos ânodos para obter um desempenho três vezes melhor do que as baterias de íon lítio e grafite atuais. Cientistas da Universidade da Califórnia em Riverside têm se concentrado no desenvolvimento do nano silício (CHANG, 2017), visto que ele se degrada rapidamente e é difícil de produzir

em grandes quantidades. O uso da areia como material precursor de silício, associado a processos de purificação, pulverização e moagem com sal e magnésio antes do tratamento térmico para remoção de oxigênio resultou na obtenção de silício puro, com características porosa e tridimensional, o que ajuda no desempenho e, potencialmente, na vida útil das baterias (SCHWAN; NAVA; MANGOLINI, 2020).

Buscando superar o problema da instabilidade do silício em baterias de íon lítio, pesquisadores da Universidade Leste da Finlândia desenvolveram um método para produzir um ânodo híbrido usando micropartículas de silício mesoporoso e nanotubos de carbono (IKONEN et al., 2020). O objetivo final foi substituir o grafite do ânodo nas baterias por silício, que tem dez vezes mais capacidade de energia, melhorando seu desempenho.

3.1.3 Baterias de íon lítio de estado sólido

As baterias de estado sólido tradicionalmente oferecem estabilidade, mas ao custo de difusão lenta dos íons, comprometendo a capacidade específica, cinética de carregamento e a potência de descarga. Em um estudo realizado por cientistas da Toyota envolvendo testes com baterias de estado sólido com condutores superiônicos de sulfeto, resultou no desenvolvimento de uma bateria que pode operar ao nível de supercapacitor para carga ou descarga completa em apenas sete minutos, o que a torna ideal para carros. Por ser de estado sólido, isso também significa ser mais estável e segura que as baterias convencionais (KATO et al., 2016).

3.1.4 Baterias de lítio enxofre

Os pesquisadores da Universidade de Monash desenvolveram uma bateria de lítio enxofre para *smartphone* com autonomia para 5 dias, superando as convencionais de íon lítio (SHAIBANI, 2022). Essa nova tecnologia tem um impacto ambiental menor do que a bateria de íon lítio e menor custo de fabricação, e com potencial para alimentar um veículo por 1000 Km.

3.1.5 Baterias livres de metais pesados como níquel e cobalto

A *IBM Research* relatou a descoberta de novos materiais extraídos da água do mar promissores para serem utilizados no desenvolvimento de baterias ambientalmente corretas, ou seja, livre de metais pesados como níquel e cobalto. Outra vantagem desse tipo de bateria se concentra no desempenho que pode potencialmente superar de íon-lítio (STAFF, 2019). A empresa afirma que esses materiais nunca foram usados em combinação numa bateria, permitindo obter menor custo de fabricação, carregamento mais rápido

que o íon-lítio, além de possuir uma relação de densidade de energia elevada e baixa inflamabilidade dos eletrólitos.

3.1.6 Baterias de grafeno

As baterias de grafeno (ALMARZA, 2017) tem potencial para ser uma das baterias de melhor desempenho. A *Grabat Energy - Grafenano* desenvolveu baterias de grafeno para carros elétricos que podem oferecer autonomia de até 805 Km, com a vantagem de serem totalmente carregadas em apenas alguns minutos e capacidade de carga e descarga 33 vezes mais rápida que o íon lítio. Para o mercado de carros elétricos, a descarga rápida (em elevada quantidade de potência) é crucial para permitir que os carros possam arrancar rapidamente.

3.1.7 Baterias de íon sódio

O desenvolvimento de novos tipos de baterias sem a presença de íon-lítio ainda é um grande desafio. Alguns cientistas estão desenvolvendo novas baterias utilizando íon sódio, um dos materiais mais abundantes do planeta. Existe uma premissa que essas baterias serão até sete vezes mais eficientes do que as convencionais. Em (ABRAHAM, 2020), foi comparado o desempenho e custo das baterias de íon sódio com as de íon lítio e concluíram que a de íon sódio podem ser muito mais baratas. Estima-se que a comercialização das baterias para *smartphones*, carros e outras cargas, deve se iniciar nos próximos 5 a 10 anos.

3.2 Supercapacitores

Supercapacitores, ou ultracapacitores, têm tipicamente de 10 a 100 vezes mais energia do que capacitores eletrolíticos para o mesmo volume, toleram mais ciclos de carga e descarga (por volta de 500 milhões) que as baterias recarregáveis e também são mais rápidos (GONZÁLEZ et al., 2016). Uma desvantagem é relacionada à tensão de operação da célula do supercapacitor, que deve ser mantida baixa de modo a evitar a decomposição química dos eletrólitos. Podem ser usados na rede elétrica para regulação de frequência, suavizar a variação das fontes renováveis e na melhoria da qualidade de energia da rede. Os supercapacitores são também chamados Electrical Double Layer Capacitor (EDLC) (GABAY, 2013). A Figura 22 ilustra dois modelos clássicos.

Os supercapacitores são formados por dois eletrodos eletricamente isolados por uma membrana semipermeável, que funciona como separador (VANGARI; PRYOR; JIANG, 2013). Ambos, eletrodos e separador, são impregnados de uma solução, o eletrólito, que

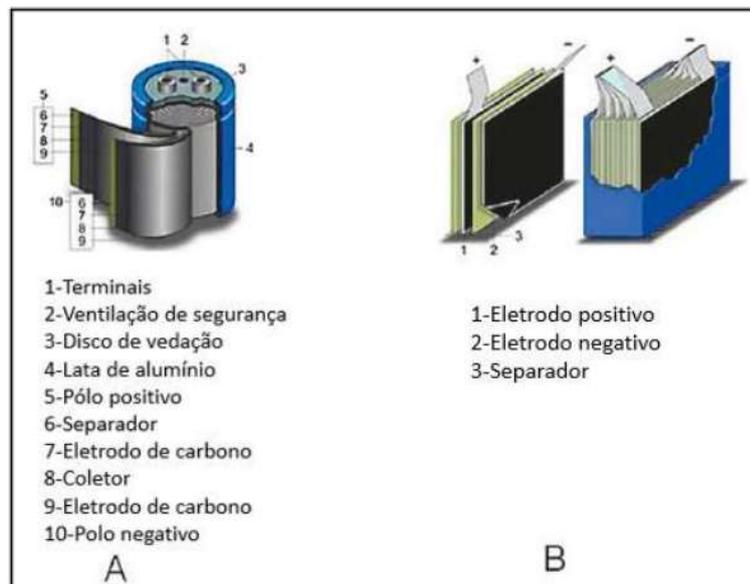


Figura 22 – Estrutura dos supercapacitores.

Fonte: Adaptado de (JON GABAY, 2013).

permite o fluxo de corrente iônica entre os eletrodos e bloqueia a corrente elétrica que descarregaria a célula. A grande maioria dos sistemas de controle de ângulo das pás de turbinas eólicas é equipado com supercapacitores, pela rapidez na carga/descarga e pelo custo.

3.3 Considerações finais sobre o capítulo

Como visto, diversas tecnologias de armazenamento de energia, estão sendo estudadas e desenvolvidos por cientistas e empresas pelo mundo. Com o avanço dos estudos, inúmeras outras tecnologias promissoras ainda tendem a surgir. O grande desafio está em aliar as possibilidades técnicas com a necessidade comercial em grande escala para contribuir com o problema energético que se vive atualmente.

No Capítulo 4, são apresentados sistemas de controle e gerenciamento, além do sistema híbrido bateria e supercapacitor, que buscam aprimorar o desempenho dos sistemas de armazenamento de energia conhecidos.

4 SISTEMAS DE CONTROLE E HÍBRIDO PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Além das pesquisas apresentadas sobre a evolução das baterias no Capítulo 3, se faz necessário mencionar técnicas de controle e monitoramento mais eficientes, que proporcionam maior flexibilidade na operação de sistemas de armazenamento com baterias e é a principal diferença entre os sistemas convencionais e os sistemas modernos.

A aplicação de sistemas de controle e monitoramento deve considerar o tipo de bateria utilizada, visto que cada tecnologia opera com características distintas, entre elas: faixas amplas de estado de carga ou apresentam densidade de potência e de energia muito baixas. Nesta seção são apresentadas áreas de estudo promissoras relativas ao tema.

4.1 Sistemas de gerenciamento BMS

Na Figura 23 foi demonstrado um sistema de gerenciamento de bateria, comumente chamado de Battery Management System (BMS), que controla e monitora vários parâmetros, entre os quais o estado de carga, a estimativa do estado de “saúde” da bateria, a temperatura, a corrente, a tensão, a proteção contra curto-circuito, o excesso de carga, as descargas profundas e o superaquecimento.



Figura 23 – Sistema de gerenciamento de bateria.

Fonte: Retirado de (LITHIUM-ION-BATTERY, 2017).

4.2 Sistemas de gerenciamento de bateria Panasonic

Embora as baterias de íon lítio estejam em todos os lugares e com uso crescente, o gerenciamento dessas baterias, incluindo a determinação do fim de sua vida útil continua sendo um desafio. A *Panasonic* está desenvolvendo uma nova tecnologia de gerenciamento de bateria (PANASONIC, 2022), que a tornará muito mais fácil monitorar e determinar o valor residual de íon-lítio nelas. Isto contribuirá com a sustentabilidade visto que será possível gerenciar a reutilização e reciclagem de baterias de íon-lítio.

4.3 Modulação assimétrica de temperatura

Em (YANG et al., 2019) demonstra-se um método de carga rápida que fornece 322 km de autonomia para o carro elétrico em cerca de 10 minutos e com carregamento de 400 kW. Um dos problemas desse método é o revestimento de lítio nas baterias, de modo que o método de modulação de temperatura assimétrica carrega a uma temperatura mais alta para reduzir esse revestimento, mas limita esse processo a ciclos de 10 minutos, evitando o crescimento da interfase de eletrólito sólido, o que pode reduzir a vida útil da bateria. O método é relatado para reduzir a degradação da bateria enquanto permite a carga extra rápida.

4.4 Sistema híbrido bateria e supercapacitor

Pesquisadores do Canadá (KOUCHACHVILI; YAÏCI; ENTCHEV, 2018) entendem que as baterias disponíveis não atendem inteiramente as demandas de consumo de energia e afirmam que um dos principais problemas é o consumo não monotônico de energia acompanhado por mudanças frequentes durante o processo de descarga da bateria. Isto é muito prejudicial ao processo eletroquímico da bateria. Uma solução prática é acoplar a bateria chumbo ácido a um supercapacitor, com uma taxa mais elevada de capacidade e melhor ciclabilidade.

A bateria funciona bem quando é descarregada monotonicamente porque a reação eletroquímica correspondente pode prosseguir da mesma forma. No entanto, quando uma MR requer o consumo repentino, que demandam pico de energia, a bateria não pode ser descarregada com rapidez suficiente para satisfazer este requisito. Dessa forma, associar uma bateria a um supercapacitor em uma arquitetura de um sistema híbrido pode assegurar uma vida útil maior para a bateria.

Em (LUO et al., 2021), são apresentadas três configurações para essa topologia híbrida Hybrid Energy Storage System (HESS), são elas:

- **Passiva:** configuração mais simples e barata, que possuem a bateria chumbo ácido e o supercapacitor conectados diretamente em paralelo, sem nenhuma eletrônica de potência ou controle. Nesta configuração, a tensão no capacitor tem pouca variação, e, portanto, torna o supercapacitor subutilizado, auxiliando então apenas em aumento da vida útil da bateria;
- **Semi-ativa:** essa configuração aplica eletrônica de potência ou controle, ou na bateria ou nos supercapacitores, isolando um dos dois elementos e permitindo dessa forma, uma flexibilidade de energia entre os dois, visando aumentar a taxa de operação e aproveitamento do supercapacitor. Porém, essa configuração pode trazer efeitos negativos, correntes de surto para a bateria caso seja ela o elemento passivo ou flutuação da tensão do barramento, afetando a qualidade de energia, no caso do supercapacitor estar isolado; e
- **Ativa:** nessa configuração, visa-se sanar os inconvenientes técnicos encontrados nas configurações passiva e semi-ativa, aplicando controle eletroeletrônico em ambos os elementos, bateria e supercapacitores.

A escolha da configuração mais adequada para uma aplicação é feita com base em fatores como custo, eficiência, controlabilidade, complexidade do sistema e taxa de utilização. Nesse trabalho optou-se trabalhar com a configuração passiva, para que em estudos futuros, sejam analisadas as configurações semi-ativa e ativa.

4.5 Considerações finais sobre o capítulo

O capítulo permite uma reflexão que as tecnologias não necessariamente precisam trabalhar de forma individual, se faz necessário por muitas vezes, a associação de duas ou mais tecnologias. Além disso, é possível observar que, não apenas um avanço na pesquisa de novos materiais se faz necessário, e que também, torna-se indispensável um alinhamento com o avanço nos estudos relacionados a eletrônica para controle e gerenciamento desses sistemas de armazenamento.

5 METODOLOGIA

Este capítulo tem o intuito de apresentar a estrutura metodológica aplicada nessa dissertação. Apresenta-se uma descrição sobre a metodologia, os materiais e equipamentos utilizados, além de descrever os ensaios que as amostras foram submetidas.

5.1 Materiais

A bateria de chumbo ácido foi escolhida por ser tratar de uma tecnologia bastante conhecida e utilizada atualmente no Brasil.

As vantagens já citadas a respeito dessa tecnologia são: baixo custo, alta tolerância de temperatura de carga e descarga, maturidade na aplicação, normatização.

Como características técnicas, a bateria possui seis células de 2 V cada, com capacidade nominal de 2,5 Ah e tensão nominal de 12 V. Na Figura 24 foi ilustrada a bateria chumbo ácido utilizada nas amostras.



Figura 24 – Bateria chumbo ácido.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O supercapacitor foi selecionado, conforme citado na dissertação, por se tratar de uma tecnologia que vem apresentando resultados positivos em pesquisas relacionadas ao tema. O banco de supercapacitores que foi utilizado é formado por seis supercapacitores com capacidade nominal 500 F e 2,7 V cada, configurados em uma associação série, resultando

numa capacitância total de 83,33 F e tensão total de 16,2 V. Na Figura 25 apresenta-se o banco de supercapacitores utilizado na segunda amostra.



Figura 25 – Banco de supercapacitores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Descrição

A metodologia aplicada aos ensaios laboratoriais desenvolvida nesta dissertação, consiste em realizar um estudo de viabilidade para associação de supercapacitores e bateria chumbo ácido para aplicação em MR, utilizando uma configuração conhecida como passiva, quando a bateria é conectada diretamente aos terminais do supercapacitor, sem aplicação de controle eletroeletrônico.

Para tal finalidade, foram analisadas quatro amostras, sendo elas:

- **Amostra 1:** Bateria chumbo ácido 1;
- **Amostra 2:** Bateria chumbo ácido 2;
- **Amostra 3:** Bateria chumbo ácido e supercapacitores 1; e
- **Amostra 4:** Bateria chumbo ácido e supercapacitores 2.

As amostras foram submetidas aos ensaios laboratoriais, simulando dois perfis de consumo residenciais distintos, são eles:

- **Perfil de consumo 1:** Residência com 2 moradores (1 casal); e
- **Perfil de consumo 2:** Residência com 5 moradores (1 casal e 3 filhos).

Os perfis de consumo residenciais considerados no trabalho, estão de acordo com um estudo realizado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), a

pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial (PROCEL, 2019). Nessa pesquisa é feito um levantamento do número de aparelhos eletrodomésticos e fator de utilização desses elementos no cotidiano da residência.

Além da pesquisa de posse e hábitos realizada pelo (PROCEL, 2019), para realizar as simulações, foi levado em consideração uma divisão das 24 horas do dia em períodos, com a seguinte formatação:

- **Primeiro período do sono:** PS1 - 0h as 06h;
- **Café da manhã:** CM - 06h as 08h;
- **Primeiro período de trabalho:** T1 - 08h as 12h;
- **Almoço:** AL - 12h as 14h;
- **Segundo período de trabalho:** T2 - 14h as 18h;
- **Jantar:** JA - 18h as 21h;
- **Descanso:** DE - 21h as 23h; e
- **Segundo período do sono:** PS2 - 23h as 24h.

Para realizar a análise das amostras, foi utilizado um equipamento de teste de vida ciclada, a fim de submeter as amostras por um período de 35 dias, para atingir dados concretos que pudesse fornecer uma análise e conclusões para esse estudo de viabilidade.

5.3 Ensaios

Durante o período de 18/02/2022 a 25/03/2022, foram realizados os ensaios laboratoriais do trabalho, baseados nas normas:

- **Norma (ABNT-NBR-15941, 2019):**, especifica os métodos de ensaios para baterias chumbo ácido para motocicletas, triciclos e quadriciclos também foi utilizada como referência para o trabalho; e
- **Norma (ABNT-NBR-16767, 2019):** responsável por padronizar os testes em elementos e baterias estacionárias para aplicação em sistemas fotovoltaicos não conectados à rede elétrica de energia, sistema intitulado de *offgrid*.

Os ensaios foram desenvolvidos, através do equipamento de teste de vida ciclada modelo iDCLT- 10X30A-12V, ilustrado na Figura 26. Os circuitos do equipamento utilizado são destinados à realização de testes de vida ciclada em baterias automotivas, estacionárias ou tracionárias de chumbo ácido.



Figura 26 – Equipamento de teste de vida ciclada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Esse equipamento está instalado em um laboratório acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e é calibrado por uma empresa Rede Brasileira de Calibração (RBC).

O laboratório possui elevado grau de confiabilidade nos ensaios para indústrias de baterias da cidade de Bauru e outras regiões do Brasil, entre os ensaios realizados no laboratório, destacam-se: ciclo de durabilidade, descarga rápida a baixas temperaturas, capacidade de referência, reserva de capacidade, perda de capacidade elétrica, resistência a vibração, estanqueidade, perda de água, determinação da resistência interna e auto-descarga.

Na Figura 27 são exibidas as quatro amostras em análise (duas amostras de bateria chumbo ácido isoladas e duas amostras de bateria chumbo ácido com supercapacitores) no período de realização dos ensaios laboratoriais, ressalta-se que as quatro amostras utilizaram baterias chumbo ácido com as mesmas especificações técnicas.

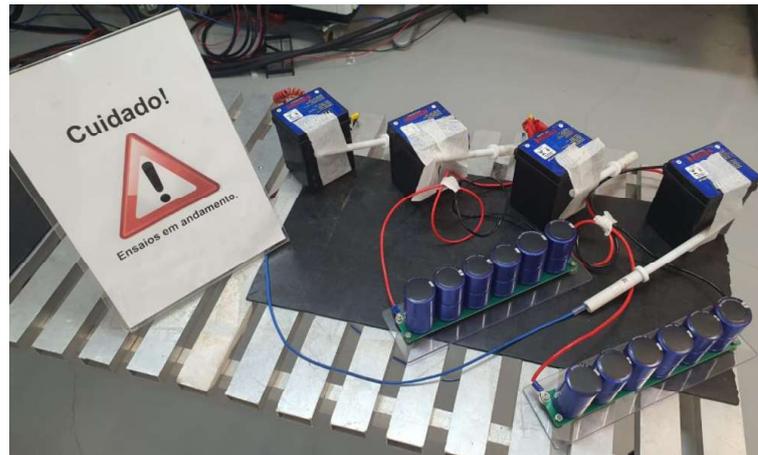


Figura 27 – Amostras durante o período dos ensaios laboratoriais.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os ensaios (Validação de capacidade nominal e Período de ciclos carga/descarga) foram realizados em 9 etapas e a sequência da metodologia adotada é apresentada de maneira simplificada na Figura 28.

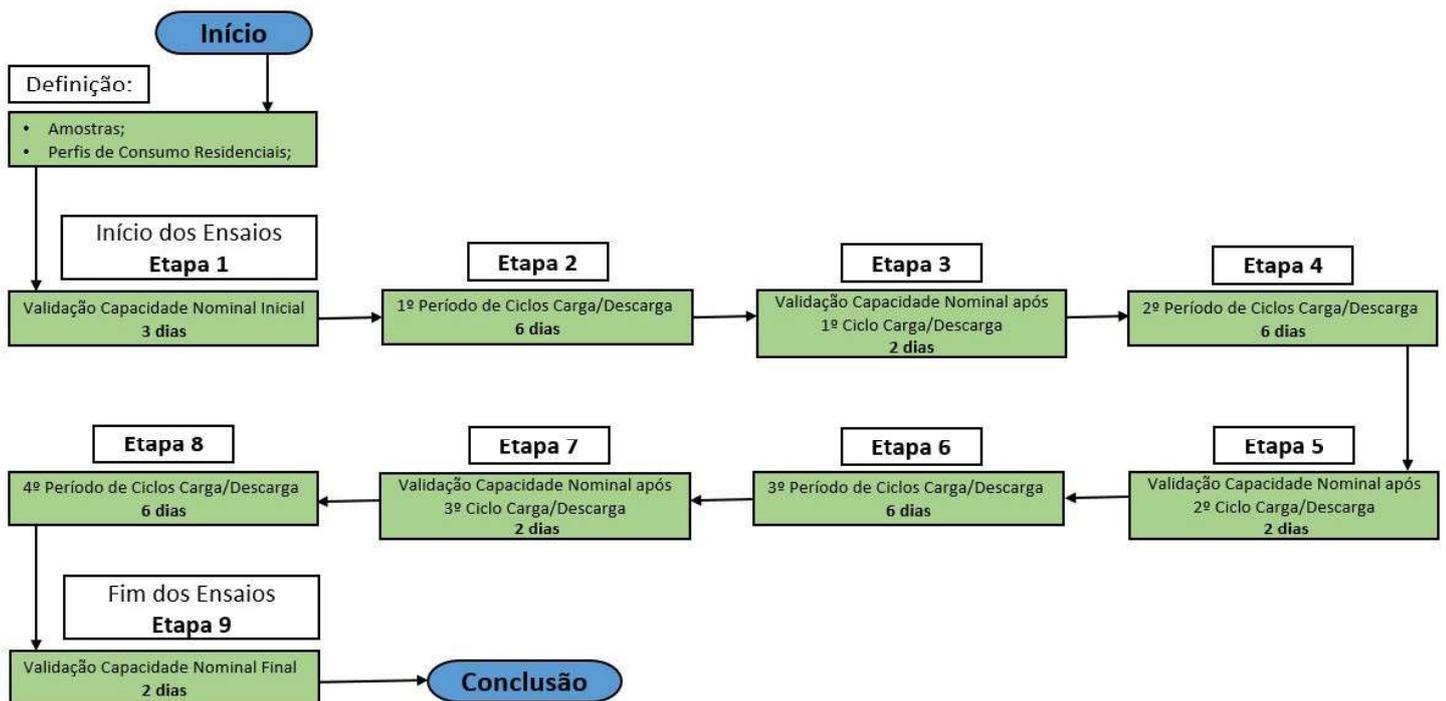


Figura 28 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Além da Figura 28 ilustrar a metodologia de ensaios realizados, apresentam-se as características de cada etapa:

- **1ª Etapa** - Validação da capacidade nominal inicial antes do 1º Período de ciclos carga/descarga: 5 ensaios de capacidade C10;
- **2ª Etapa** - 1º Período de ciclos carga/descarga: 3 dias perfil de consumo 1 e na sequência 3 dias de perfil de consumo 2;
- **3ª Etapa** - Validação da capacidade nominal após 1º período de ciclos carga/descarga: 5 ensaios de capacidade C10;
- **4ª Etapa** - 2º Período de ciclos carga/descarga: 3 dias perfil de consumo 1 e na sequência 3 dias de perfil de consumo 2;
- **5ª Etapa** - Validação da capacidade nominal após 2º período de ciclos carga/descarga: 5 ensaios de capacidade C10;
- **6ª Etapa** - 3º Período de ciclos carga/descarga: 3 dias perfil de consumo 1 e na sequência 3 dias de perfil de consumo 2;
- **7ª Etapa** - Validação da capacidade nominal após 3º período de ciclos carga/descarga: 5 ensaios de capacidade C10;
- **8ª Etapa** - 4º Período de ciclos carga/descarga: 3 dias perfil de consumo 1 e na sequência 3 dias de perfil de consumo 2; e
- **9ª Etapa** - Validação da capacidade nominal final após 4º Período de ciclos carga/descarga: 5 ensaios de capacidade C10.

5.3.1 Ensaio para validação de capacidade nominal

Para a validação da capacidade nominal das amostras, antes e depois dos períodos de ciclos carga/descarga, foram realizados os ensaios em C10 - ensaio de capacidade em regime nominal de 10 horas, seguindo as orientações da norma (ABNT-NBR-15941, 2019). O ensaio em C10 visa analisar quanto tempo a amostra levou para chegar em 10,5 V, tensão final de descarga da bateria considerada na norma utilizada.

A bateria deve estar em plena carga e o ensaio deve ser realizado com a temperatura da bateria em $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$, no máximo 48 horas após a bateria ter atingindo o estado de plena carga. A bateria deve ser descarregada com uma corrente constante igual a I10 ($\pm 1\%$), sendo I10 calculada de acordo com a equação 4:

$$I_{10} = \frac{\text{Capacidade Nominal}}{10} = \frac{2,5 \text{ Ah}}{10 \text{ h}} = 0,25 \text{ Ah} \quad (4)$$

Considerando a capacidade nominal de 2,5 Ah das baterias utilizadas nos ensaios, foi calculado $I_{10} = 0,25 \text{ Ah}$. A tensão final de descarga deve ser de 10,5 ($\pm 0,05\text{V}$) e o valor de capacidade real é o produto do tempo total de descarga, em horas, pela corrente utilizada.

Para cada ensaio de validação de capacidade nominal das amostras foram realizados 5 ensaios em C10 com 5 rotinas cada, em momentos distintos, conforme apresentado na Figura 28. Os resultados em horas dos 5 ensaios em C10 referente a cada etapa de validação da capacidade nominal, são apresentados nas tabelas 4, 5, 6, 7 e 8. Na Tabela 1 são apresentadas as rotinas de testes aplicadas em C10.

Perfil	Amostra 1, 2, 3 e 4
Plena Carga	I10 até 14,4 V + 4 h
Repouso	4 h
Capacidade	I10 até 10,5 V
Plena Carga	I10 até 14,4 V + 4 h

Tabela 1 – Parâmetros para validação da capacidade nominal das amostras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Ensaio de desempenho frente a ciclos de carga/descarga para aplicações fotovoltaicas

Considerando a norma (ABNT-NBR-16767, 2019), a bateria deve ser submetida a um grande número de ciclos com baixa profundidade de descarga, mas em diferentes State of Charge (SoC).

Esse ensaio foi elaborado a fim de simular a operação em condições extremas, com as baterias sendo submetidas a vários ciclos sequenciais de carga e descarga, numa temperatura superior a 40 °C. As quatro amostras foram submetidas a dois perfis de consumo residenciais distintos, com o objetivo de simular o processo de envelhecimento das baterias.

Na Tabela 2 é possível verificar as características do perfil de consumo 1, referente a uma residência com 2 moradores (1 casal).

Equipamento	Rotina	Período
Geladeira	Liga a cada 1 hora	24 horas
Chuveiro	30 minutos	CM - 06 h as 08 h
Máquina de Lavar	2 horas	T1 - 08 h as 12 h
Chuveiro	30 minutos	JA - 18 h as 21 h
Iluminação	3 horas	JA - 18 h as 21 h

Tabela 2 – Perfil de consumo 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29 é possível observar as características do perfil de consumo 1 no decorrer das 24 horas do dia.

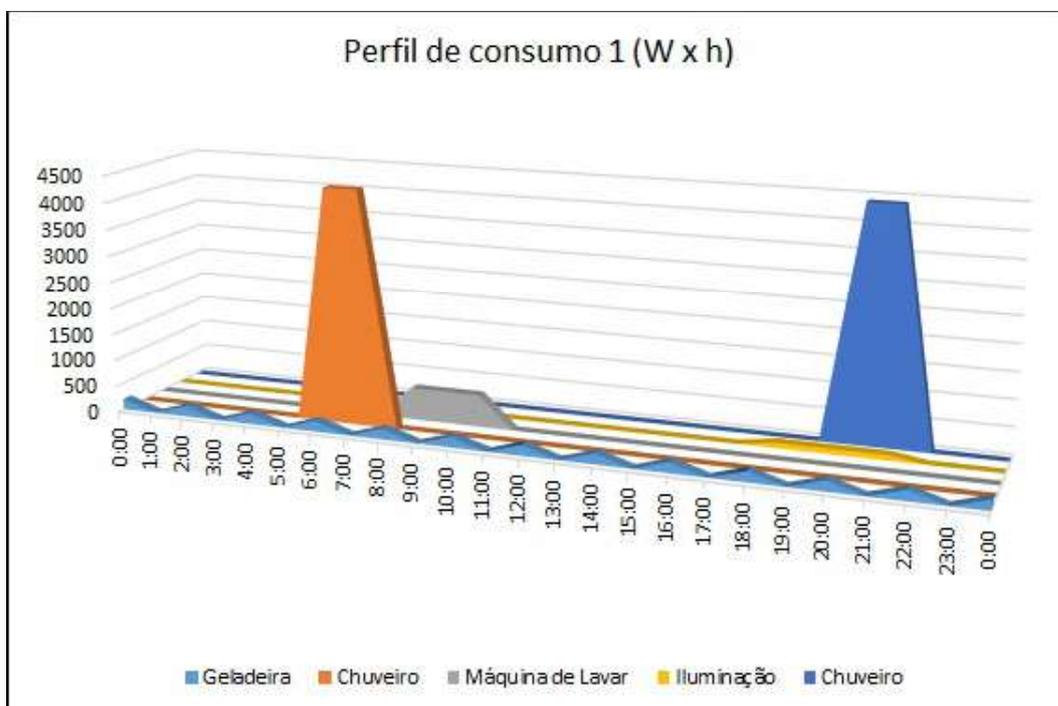


Figura 29 – Perfil de consumo 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 3 é possível verificar as características do perfil de consumo 2, referente a uma residência com 5 moradores (1 casal e 3 filhos).

Equipamento	Rotina	Período
Geladeira	Liga a cada 1 hora	24 horas
Freezer	Liga a cada 1 hora	24 horas
Ar Condicionado 1	4 horas	PS1 - 00 h as 06 h
Ar Condicionado 2	4 horas	PS1 - 00 h as 06 h
Ar Condicionado 3	4 horas	PS1 - 00 h as 06 h
Ar Condicionado 4	4 horas	PS1 - 00 h as 06 h
Chuveiro	1 hora	CM - 06 h as 08 h
Máquina de Lavar	2 horas	T1 - 08 h as 12 h
Ar Condicionado 5	4 horas	T2 - 14 h as 18 h
Forno Elétrico	1 hora	JA - 18 h as 21 h
Chuveiro	1 hora	JA - 18 h as 21 h
Iluminação	3 horas	JA - 18 h as 21 h

Tabela 3 – Perfil de consumo 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 30 é possível observar as características do perfil de consumo 2 no decorrer das 24 horas do dia.

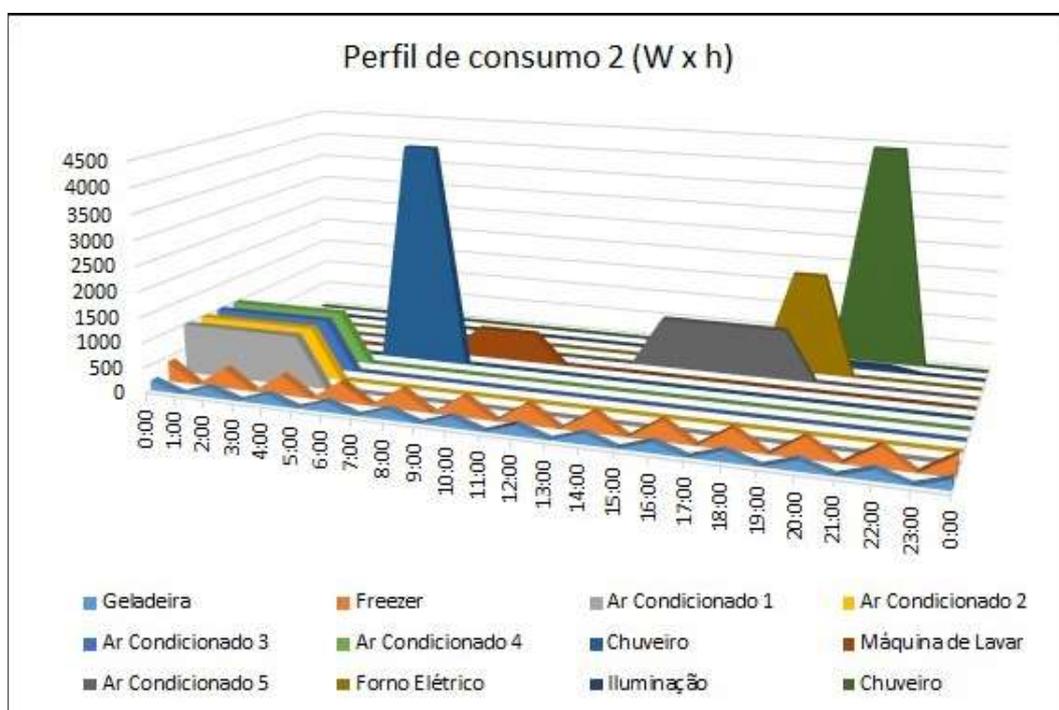


Figura 30 – Perfil de consumo 2.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de corrente elétrica configurados no equipamento de teste de vida ciclada para simulação das cargas citadas nos perfis de consumo 1 e 2 foram determinados de forma proporcional a capacidade nominal das baterias e banco de supercapacitores utilizados nas amostras. A programação do equipamento de teste levou em consideração, além da capacidade nominal das amostras, o tipo de carga e a potência da carga.

5.3.3 Ensaio de rotina

Durante a execução dos ensaios descritos anteriormente, validação de capacidade nominal e desempenho frente a ciclos de carga/descarga para aplicações fotovoltaicas, as quatro amostras (duas bateria chumbo ácido e dois conjunto híbrido bateria chumbo ácido e supercapacitor) foram acompanhadas por ensaio de rotina, com inspeção visual de hora em hora.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos, referente às capacidades nominais das amostras, após realização dos ensaios apresentados no Capítulo 5. O objetivo desse capítulo é extrair conclusões gerais sobre o benefício de um sistema híbrido, ao invés de se limitar a um sistema específico.

6.1 Análise bateria chumbo ácido e supercapacitores

Na equação 5 é apresentado o cálculo de potência para as baterias chumbo ácido utilizadas nos ensaios, verifica-se potência de 30 Wh para cada bateria.

$$\text{Potência} = V \cdot I = 12 \text{ V} \cdot 2,5 \text{ Ah} = 30 \text{ Wh} \quad (5)$$

Considerando que 1 Wh equivale a 3600 joules, apresenta-se na equação 6, o cálculo de energia das baterias chumbo ácido utilizadas nos ensaios. Verifica-se energia de aproximadamente 108.000 joules para cada bateria chumbo ácido.

$$\text{Energia} = 30 \text{ Wh} \cdot 3.600 \text{ joules} = 108.000 \text{ joules} \quad (6)$$

Na equação 7 é apresentado o cálculo de energia do banco de supercapacitor utilizado nos ensaios, verifica-se energia de aproximadamente 11.000 joules para o banco de supercapacitor.

$$\text{Energia} = \frac{C \cdot V^2}{2} = \frac{83,3F \cdot 16,2V^2}{2} = 11.000 \text{ joules} \quad (7)$$

A partir dos valores de energia apresentados, é possível observar que a bateria chumbo ácido utilizada possui energia superior ao banco de supercapacitor, enquanto a bateria chumbo ácido apresenta 108.000 joules, o banco de supercapacitor 11.000 joules.

A bateria chumbo ácido apresenta maior energia, se comparado ao supercapacitor, porém, demanda que a corrente elétrica seja drenada por um tempo mais elevado. No supercapacitor, a energia é menor, todavia, permite descarregar uma corrente elétrica mais elevada em um período curto de tempo.

O banco de supercapacitor utilizado, apresenta corrente nominal de 40 A e uma corrente de pico de 264,7 A de acordo com o *data sheet* do fabricante.

6.2 Análise da capacidade nominal antes do 1º período de ciclos carga/descarga

A análise de capacidade nominal inicial foi realizada nas quatro amostras antes de iniciar os ciclos de carga/descarga. As baterias chumbo ácido aplicadas nas amostras possuem características importantes, são elas: especificações técnicas iguais, baterias novas, porém, é importante salientar que são baterias encaminhadas para testes de certificação no laboratório que foram realizados os ensaios.

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos ensaios em C10 antes do início dos períodos de ciclos carga/descarga. Considera-se importante essa etapa, pois nesse momento as amostras ainda não haviam sido submetidas aos períodos de carga/descarga.

C10	Amostra 1 (h)	Amostra 2 (h)	Amostra 3 (h)	Amostra 4 (h)
1	06:04:09	08:26:41	13:19:47	12:10:39
2	07:25:46	08:36:48	12:06:07	11:36:17
3	07:54:45	08:01:08	11:16:19	11:22:41
4	08:02:03	06:51:03	10:36:26	10:50:45
5	07:49:26	05:42:53	10:18:11	10:19:21

Tabela 4 – Validação da capacidade nominal inicial.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ilustra-se na Figura 31, a semelhança nos resultados das amostras 3 e 4 durante os 5 ensaios de capacidade em C10. As amostras 1 e 2 apresentam leve desequilíbrio ao término dos 5 ensaios. A amostra 3 apresentou tempo de 10:18:11, a amostra 4 tempo de 10:19:21, já as amostras 1 e 2 apresentaram tempos de 07:49:26 e 05:42:53 respectivamente.

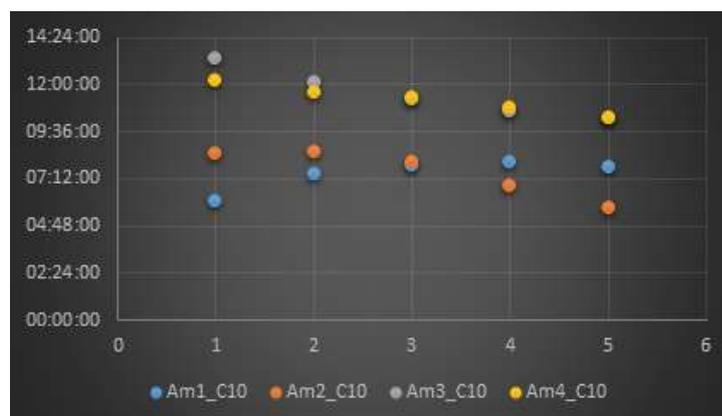


Figura 31 – Validação da capacidade nominal inicial.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 Análise da capacidade nominal após 1º período de ciclos carga/descarga

Na Tabela 5 são apresentados os valores dos ensaios em C10 após o 1º período de ciclos carga/descarga.

C10	Amostra 1 (h)	Amostra 2 (h)	Amostra 3 (h)	Amostra 4 (h)
1	03:54:50	01:09:44	08:58:44	08:49:50
2	04:23:26	01:23:54	08:39:52	08:26:08
3	04:41:01	00:59:19	08:00:47	07:37:49
4	04:19:15	00:50:17	07:12:03	06:48:35
5	04:31:32	00:47:34	06:47:08	06:17:20

Tabela 5 – Resultados de capacidade nominal após 1º período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 32 é possível verificar que as duas amostras híbridas apresentaram valores em horas superiores as amostras de bateria isoladas, após o 1º período de ciclos carga/descarga, e seguem com similaridades nos resultados dos 5 ensaios de capacidade.

Além disso, a análise permite verificar que a amostra 2 (bateria isolada) iniciou processo de falha, com os valores de capacidade próximos a apenas 1 hora. Esse stress apresentado pela amostra 2, pode ser justificado pelo fato dessas baterias ainda não apresentarem certificação de qualidade para o mercado consumidor. Amostras 3 e 4 apresentaram tempos de 06:47:08 e 06:17:20 respectivamente.

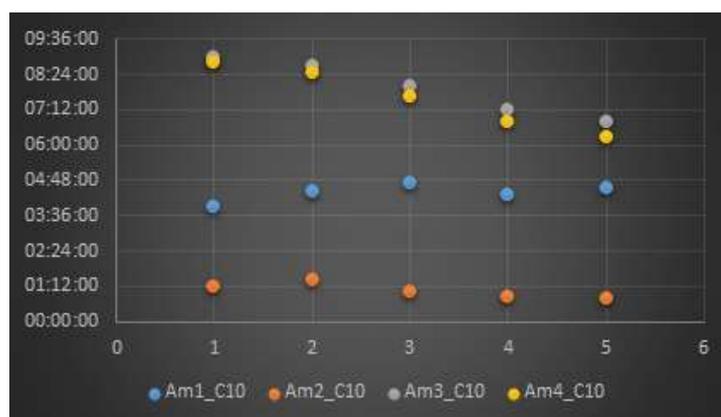


Figura 32 – Resultados de capacidade nominal após 1º período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 Análise da capacidade nominal após 2º período de ciclos carga/descarga

Na Tabela 6 são apresentados os valores dos ensaios em C10 após o 2º período de ciclos carga/descarga.

C10	Amostra 1 (h)	Amostra 2 (h)	Amostra 3 (h)	Amostra 4 (h)
1	02:30:59	00:20:15	05:57:48	05:29:29
2	02:47:10	00:14:24	05:27:00	05:23:50
3	03:03:42	00:14:39	05:03:53	05:03:53
4	03:09:19	00:14:58	04:40:03	04:43:33
5	03:14:36	00:15:26	04:19:36	04:22:14

Tabela 6 – Resultados de capacidade nominal após 2º período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o 2º período de ciclos carga/descarga, observa-se na Figura 33 que a amostra 2 (bateria isolada) atingiu a falha, não correspondendo aos ensaios de capacidade em C10.

Somado a isso, observa ainda, similaridade nos resultados de capacidade entre as duas amostras híbridas. A amostra 3 apresentou tempo de 04:19:36, a amostra 4 tempo de 04:22:14, enquanto que a amostra 1 apresentou tempo de 03:14:36.

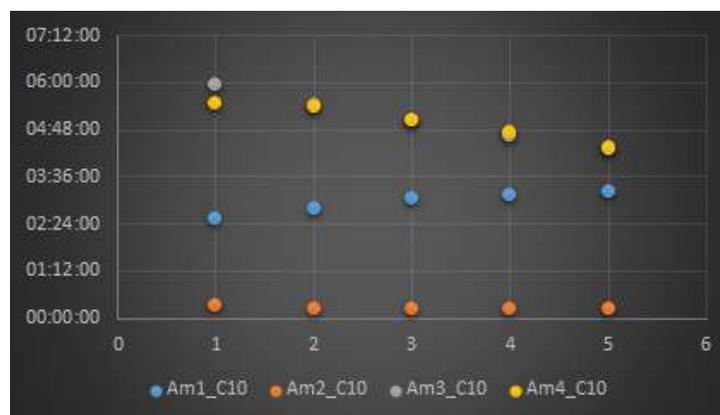


Figura 33 – Resultados de capacidade nominal após 2º período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 Análise da capacidade nominal após 3º período de ciclos carga/descarga

Na Tabela 7 são apresentados os valores dos ensaios em C10 após o 3º período de ciclos carga/descarga.

C10	Amostra 1 (h)	Amostra 2 (h)	Amostra 3 (h)	Amostra 4 (h)
1	02:13:23	00:17:01	04:03:55	04:03:57
2	02:06:23	00:13:06	03:45:49	03:47:44
3	02:14:50	00:13:22	03:27:59	03:27:00
4	01:52:33	00:12:22	03:15:19	03:13:53
5	01:58:46	00:11:18	03:05:21	03:05:25

Tabela 7 – Resultados de capacidade nominal após 3º período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o 3º período de ciclos carga/descarga, o processo de envelhecimento das amostras pode ser observado na figura 34. As amostras 3 e 4 diminuíram a capacidade para 03:05:21 e 03:05:25 respectivamente, mesmo assim, com tempos superiores as amostras 1 e 2.

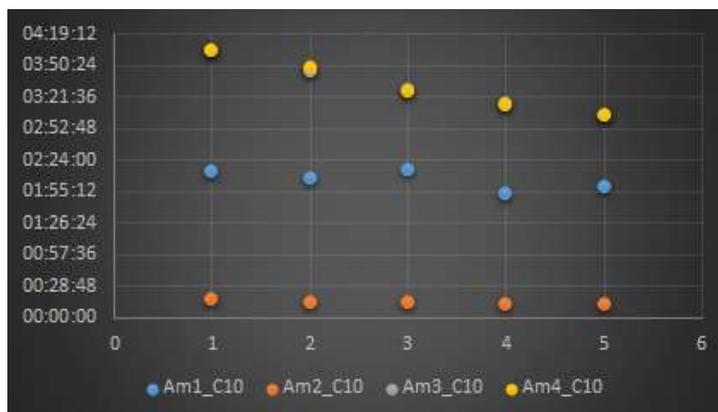


Figura 34 – Resultados de capacidade nominal após 3º período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.6 Análise da capacidade nominal após 4^o período de ciclos carga/descarga

O resultados finais dos ensaios de capacidade em C10, são apresentados na Tabela 8. Os valores apresentados, foram tabulados, portanto, após as amostras estarem submetidas a 24 dias de períodos de carga/descarga.

C10	Amostra 1 (h)	Amostra 2 (h)	Amostra 3 (h)	Amostra 4 (h)
1	01:50:24	00:03:39	03:04:03	02:59:24
2	01:32:29	00:02:15	02:50:05	02:47:41
3	01:34:06	00:01:30	02:41:46	02:38:59
4	01:39:25	00:01:30	02:33:03	02:31:36
5	01:46:47	00:01:43	02:24:55	02:23:43

Tabela 8 – Resultados de capacidade nominal após 4^o período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 35, ilustra-se o cenário final de capacidade nominal em C10 das amostras estudadas. Como citado anteriormente, a amostra 2 apresentou falha. A comparação pode ser realizada entre amostra 1 (bateria isolada) e amostras 3 e 4 (híbridas)

As amostras híbridas, apresentam grande diferença, se comparadas a elas mesmas no início dos ensaios, porém ainda seguem com valores superiores as amostras de baterias isoladas. A amostra 1 finalizou os ensaios de capacidade com tempo de 01:46:47, enquanto que as amostras 3 e 4, com o tempo de 02:24:55 e 02:23:43, respectivamente.

Ao longo de todo os ensaios de capacidade nominal em C10, foi possível perceber melhor desempenho das amostras híbridas.

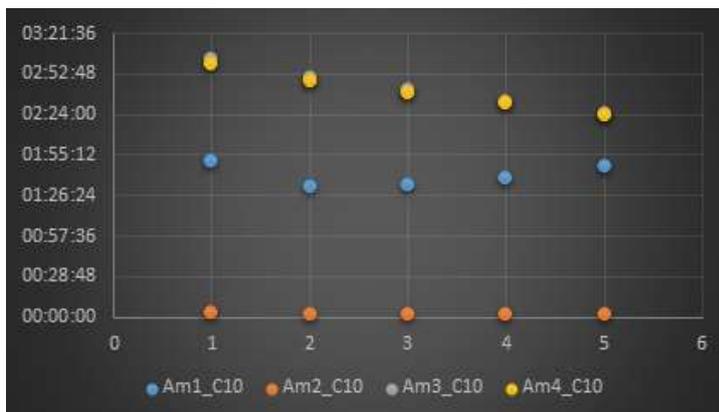


Figura 35 – Resultados de capacidade nominal após 4^o período de ciclos carga/descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.7 Considerações finais sobre os resultados

A partir das simulações desenvolvidas, foi possível concluir que as amostras híbridas (bateria chumbo ácido e supercapacitores) apresentaram nos resultados, características que apontam para um aumento da vida útil da bateria inserida nessa configuração, comparado as baterias chumbo ácido, de mesmas características, analisadas de forma isolada.

Em todos os ensaios para validação da capacidade nominal em C10 das amostras, foi possível observar que as amostras 3 e 4 (híbridas) apresentaram tempo superiores nos ensaios de capacidade, comparado as amostras 1 e 2 (baterias isoladas), isso significa que tiveram melhor desempenho e levaram mais tempo para atingirem a tensão de descarga da bateria, considerada 10,5 V pela norma utilizada como referência.

Ressalta-se que os ensaios foram realizados em ambiente controlado, seguindo as exigências das normas (ABNT-NBR-15941, 2019) e (ABNT-NBR-16767, 2019).

Aplicar essa metodologia em larga escala, torna-se um grande desafio para os profissionais da área, além de se apresentar como grande oportunidade para evolução dos sistemas de armazenamento de energia.

7 CONCLUSÃO

7.1 Aspectos gerais

Nessa dissertação, foi apresentada uma revisão bibliográfica relacionada aos desafios encontrados atualmente pelo sistema elétrico convencional e a contrapartida vantajosa que a MR apresenta.

O trabalho apresenta as principais tecnologias de baterias, sistemas de controle e arranjos híbridos para armazenamento de energia, visando sua aplicação em MR.

Em complemento, as simulações apresentam resultados comparativos entre quatro amostras em uma MR, duas amostras de bateria chumbo ácido e outras duas amostras, sendo um conjunto híbrido de bateria chumbo ácido e supercapacitores.

A aplicação desta metodologia visa desenvolver um estudo de viabilidade de implementação de um sistema híbrido bateria chumbo ácido e supercapacitor para aplicações em MR. Neste cenário, observou-se que o sistema híbrido com as características propostas, atingiu resultados satisfatórios, nas configurações técnicas estudadas, portanto apresenta viabilidade técnica para tal aplicação.

Os sistemas de armazenamento de energia são necessários para elevar o índice de aproveitamento de recursos naturais existentes atualmente, essa dissertação contribui com estudos relacionados ao tema.

7.2 Publicações aprovadas sobre a pesquisa

YGOR FERREIRA FABRE, SOUSA, A, N.; MAZON, T.; GASTALDELLO, D.; IKESHOJI, M. A; FIGUEIREDO, W. Análise do Comportamento de Arquitetura Híbrida de Armazenamento de Energia Visando o Aumento da Vida Útil da Bateria Chumbo Ácido em Microrredes. **Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica**, 2021.

YGOR FERREIRA FABRE. Análise do Comportamento de Arquitetura Híbrida de Armazenamento de Energia Visando o Aumento da Vida Útil da Bateria Chumbo Ácido em Microrredes. **XI Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**, 2021.

YGOR FERREIRA FABRE. Análise do Desempenho das Baterias Utilizadas para Armazenamento de Energia nas Microrredes Baseadas nas Fontes de Energia Renováveis. **X Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**, 2020.

7.3 Continuidade para futuras pesquisas

Como continuidade dessa pesquisa, outros ensaios experimentais podem ser desenvolvidos, objetivando elevar o grau de confiabilidade do estudo realizado.

Para o futuro, é possível desenvolver as configurações semi-ativa e ativa de estruturas híbridas descritas neste trabalho, afim de propiciar maior controle e efetividade na aplicação do banco de supercapacitores.

Além disso, será possível avaliar o desempenho de outras tecnologias de baterias nessa configuração híbrida com supercapacitor, com o intuito de contribuir com a qualidade de energia e eficiência energética do sistema.

Verifica-se como necessidade para complemento desse estudo, um levantamento detalhado com os custos de implementação, comparando as duas configurações, baterias isoladas e configurações híbridas.

Referências

ABNT-NBR-15941. **ABNT NBR 15941 NBR15941 Baterias chumbo - ácido para motocicletas**, [s.l.: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/30844/abnt-nbr15941-baterias-chumbo-acido-para-motocicletas-triciclos-e-quadriciclos-especificacao-e-metodos-de-ensaios>>. Acesso em: 17 fev. 2019.

ABNT-NBR-16767. **ABNT NBR 16767 NBR16767 Elementos e baterias estacionárias para**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12588/abnt-nbr16767-elementos-e-baterias-estacionarias-para-aplicacao-em-sistemas-fotovoltaicos-nao-conectados-a-rede-eletrica-de-energia-off-grid-requisitos-gerais-e-metodos-de-ensaio>>. Acesso em: 17 fev. 2019.

ABRAHAM, K. **How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts?** v. 5. [S.l.: s.n.], nov. 2020. P. 3544–3547. DOI:

10.1021/acseenergylett.0c02181.

ADELEKE, O.; UKIL, A.; ZHANG, X. **Vanadium Redox amp; Lithium Ion Based Multi-Battery Hybrid Energy Storage System for Microgrid**. [S.l.: s.n.], dez. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994456.

ALHAMALI, A. et al. **Review of Energy Storage Systems in electric grid and their potential in distribution networks**. [S.l.: s.n.], dez. 2016. P. 546–551. DOI: 10.1109/MEPCON.2016.7836945.

ALMARZA, O. **Una batería con autonomía de 800 kilómetros es posible gracias a una empresa española**. es. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<<https://urbantecno.com/motor/bateria-autonomia-800-kilometros-empresa-espanola>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

BAJAY, S. et al. **Impactos da inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica e de Eficiência Energética no Setor Elétrico Brasileiro: metodologia, cenários e resultados**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em:

<file:///C:/Users/Ygor/Downloads/TD3-ie-i-brasil-Impactos-da-insercao-de-GD-e-EE-no-Setor-Eletrico_Brasileiro.pdf>.

BERKE, J. **One simple chart shows why an energy revolution is coming — and who is likely to come out on top**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em:

<<https://www.businessinsider.com.au/solar-power-cost-decrease-2018-5>>.

- BYRNE, C.; VERBIC, G. **Feasibility of residential battery storage for energy arbitrage**. [S.l.: s.n.], 2013. P. 1–7. DOI: 10.1109/AUPEC.2013.6725471.
- CASTRO E GUILHERME DANTAS, N. de. **Experiências Internacionais em Geração Distribuída: Motivações, Impactos e Ajustes**. [S.l.: s.n.], 2018. P. 442. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Guillermo-Pereira-2/publication/327120758_Policies_for_distributed_solar_generation_in_Nevada/links/5b7b163392851c1e1223b3d0/Policies-for-distributed-solar-generation-in-Nevada.pdf>.
- CHAIRES, J. et al. **Solar farm hourly dispatching using super-capacitor and battery system**. [S.l.: s.n.], mar. 2016. P. 1–7. DOI: 10.1109/PSC.2016.7462867.
- CHANG, R. **UCR Researchers Developing Next-Generation Batteries**. en-US. [S.l.: s.n.], dez. 2017. Disponível em: <<https://inlandempire.us/ucr-next-generation-batteries/>>. Acesso em: 17 fev. 2022.
- CHEN, H. et al. **Progress in electrical energy storage system: A critical review**. en. v. 19. [S.l.: s.n.], mar. 2009. P. 291–312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/misc/pii/S100200710800381X>>. Acesso em: 4 mar. 2022.
- DIVYA, K. C.; ØSTERGAARD, J. **Battery energy storage technology for power systems—An overview**. v. 79. [S.l.: s.n.], 2009. P. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.017>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/misc/pii/S0378779608002642>>.
- EHSAN, A.; YANG, Q. **Coordinated Investment Planning of Distributed Multi-Type Stochastic Generation and Battery Storage in Active Distribution Networks**. v. 10. [S.l.: s.n.], out. 2018. P. 1813–1822. Conference Name: IEEE Transactions on Sustainable Energy. DOI: 10.1109/TSTE.2018.2873370.
- GABAY, J. **Supercapacitor Options for Energy-Harvesting Systems**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<https://www.digikey.com/en/miscs/supercapacitor-options-for-energy-harvesting-systems>>.
- GOLDEN, M. **Liquid-metal, high-voltage flow battery**. en. [S.l.: s.n.], jul. 2018. Section: Research. Disponível em: <<https://news.stanford.edu/2018/07/19/liquid-metal-high-voltage-flow-battery-2/>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

GOMES, L. H.; HECK, N. C. **Reciclagem de baterias chumbo-ácido: uma análise termodinâmica**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Leonardo-Gomes-27/publication/329260104_RECICLAGEM_DE_BATERIAS_CHUMBO-ACIDO_UMA_ANALISE_TERMODINAMICA/links/5f4deb99299bf13c5073a7e0/RECICLAGEM-DE-BATERIAS-CHUMBO-ACIDO-UMA-ANALISE-TERMODINAMICA.pdf>.

GONZÁLEZ, A. et al. **Review on supercapacitors: Technologies and materials**. en. v. 58. [S.l.: s.n.], 2016. P. 1189–1206. Publisher: Elsevier. Disponível em:

<<https://ideas.repec.org/a/eee/reensus/v58y2016icp1189-1206.html>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

HALL, C. **Future batteries, coming soon: Charge in seconds, last months a**. en-gb. [S.l.: s.n.], mar. 2021. Section: Technology. Disponível em:

<<https://www.pocket-lint.com/gadgets/news/130380-future-batteries-coming-soon-charge-in-seconds-last-months-and-power-over-the-air>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

HASHIMOTO, S. et al. **Capacity Determination of the DC-side Battery for Hybrid Batteries in PV Generation System**. [S.l.: s.n.], mai. 2019. P. 1745–1750. ISSN: 2378-8542. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881162.

HENDERSON, T. **Bateria de chumbo ácido selada e energia do supercapacitor - Configurações para corridas de arrancada**. [S.l.: s.n.], 2020.

IKONEN, T. et al. **Conjugation with carbon nanotubes improves the performance of mesoporous silicon as Li-ion battery anode**. en. v. 10. [S.l.: s.n.], mar. 2020. P. 5589. DOI: 10.1038/s41598-020-62564-0. Disponível em:

<<https://www.nature.com/miscs/s41598-020-62564-0>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

JAVADIAN, S. et al. **Análise de risco do sistema de proteção em redes de distribuição com GD**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/misc/pii/S0142061512004826>>.

KATO, Y. et al. **High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors**. [S.l.: s.n.], 2016.

KOUCHACHVILI, L.; YAĬCI, W.; ENTCHEV, E. **Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles**. en. v. 374. [S.l.: s.n.], jan. 2018.

P. 237–248. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.11.040. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/misc/pii/S0378775317314994>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

LAWDER, M. T. et al. **Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications**. v. 102. [S.l.: s.n.], jun. 2014. P. 1014–1030. Conference Name: Proceedings of the IEEE. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2317451.

LI, W.; LEE, S.; MANTHIRAM, A. **A Cobalt-Free Alternative to NMC and NCA Cathodes for Lithium-Ion Batteries**. English. v. 32. [S.l.: s.n.], jul. 2020. DOI: 10.1002/adma.202002718. Disponível em: <<https://www.osti.gov/pages/biblio/1637405>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

LITHIUM-ION-BATTERY. **Battery Management System**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <<http://lithiumionbattery.org/activities/battery-management-system>>.

LUO, X. et al. **Hybridizing Lead–Acid Batteries with Supercapacitors: A Methodology**. [S.l.: s.n.], 2021.

MAHESHWARI, A. **Modelling, aging and optimal operation of lithium-ion batteries**. en. [S.l.]: Technische Universiteit Eindhoven, 2018. OCLC: 8087222456. ISBN 978-90-386-4607-7.

MILLER, N. et al. **Battery energy storage systems for electric utility, industrial and commercial applications**. [S.l.: s.n.], jan. 1996. P. 235–240. DOI: 10.1109/BCAA.1996.485001.

NANDA, S.; BHARGAV, A.; MANTHIRAM, A. **Anode-free, Lean-Electrolyte Lithium-Sulfur Batteries Enabled by Tellurium-Stabilized Lithium Deposition**. en. v. 4. [S.l.: s.n.], mai. 2020. P. 1121–1135. DOI: 10.1016/j.joule.2020.03.020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/misc/pii/S2542435120301355>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

ONS. **ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico**. [S.l.: s.n.], 2019.

PANASONIC. **Panasonic Develops Battery Management Technology to Measure Electrochemical Impedance of multi-cell stacked Lithium-Ion Batteries | Headquarters News**. en. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://news.panasonic.com/global/press/data/2019/11/en191114-2/en191114-2.html>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

PROCEDIMENTOS de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - ANEEL. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

- PROCEL. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <<http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%5C%7B4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480%5C%7D>>.
- SASAKI, T.; UKYO, Y.; NOVÁK, P. **Memory effect in a lithium-ion battery**. en. v. 12. [S.l.: s.n.], jun. 2013. P. 569–575. DOI: 10.1038/nmat3623. Disponível em: <<https://www.nature.com/miscs/nmat3623>>. Acesso em: 17 fev. 2022.
- SCHWAN, J.; NAVA, G.; MANGOLINI, L. **Critical barriers to the large scale commercialization of silicon-containing batteries**. en. v. 2. [S.l.: s.n.], out. 2020. P. 4368–4389. Publisher: RSC. DOI: 10.1039/D0NA00589D. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/misclanding/2020/na/d0na00589d>>. Acesso em: 17 fev. 2022.
- SHAIBANI, M. **Supercharging tomorrow: Australia first to test new lithium batteries**. en. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.monash.edu/news/miscs/supercharging-tomorrow-australia-first-to-test-new-lithium-batteries>>. Acesso em: 17 fev. 2022.
- SILVERSTEIN, K. **Distributed Energy Resources Set to Grow at 15.9% CAGR: Navigant**. en-US. [S.l.: s.n.], jun. 2019. Section: Distributed Energy. Disponível em: <<https://microgridknowledge.com/distributed-energy-resources-navigant/>>. Acesso em: 17 fev. 2022.
- SILVESTRE, M. L. D. et al. **How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures**. v. 93. [S.l.: s.n.], 2018. P. 483–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/misc/pii/S1364032118304283>>.
- SOETHE, G. C.; BLANCHET, L. A. **Geração distribuída e desenvolvimento sustentável**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<http://www.revistaaec.com/index.php/revistaaec/misc/view/1221>>.
- SON, I. H. et al. **Graphene balls for lithium rechargeable batteries with fast charging and high volumetric energy densities**. v. 8. [S.l.: s.n.], nov. 2017. P. 1561. DOI: 10.1038/s41467-017-01823-7. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/miscs/PMC5691064/>>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- SOUZA, A. S. de; MARIANO, J. D.; JUNIOR, J. U. **SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 10kWp CONECTADO À REDE COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM CURITIBA**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/misc/view/870/870>>.

STAFF, R. **China's SVOLT to supply cobalt-free EV batteries to Great Wall.** en. [S.l.: s.n.], set. 2020. Auto & Truck Manufacturers. Disponível em: <<https://www.reuters.com/misc/svolt-electric-idUSL4N2GP2AH>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

_____. **IBM's new battery design taps seawater as alternative mineral source.** [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <<https://www.reuters.com/misc/svolt-electric-idUSL4N2GP2AH>>.

UNIVERSITY, B. **Battery University.** [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://batteryuniversity.com/misc/bu-802b-what-does-elevated-self-discharge-do>>.

VANGARI, M.; PRYOR, T.; JIANG, L. **Supercapacitors: Review of Materials and Fabrication Methods.** EN. v. 139. [S.l.: s.n.], jun. 2013. P. 72–79. Publisher: American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000102. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000102>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

VIAN, Â. et al. **Armazenamento de energia fundamentos, tecnologia e aplicações.** [S.l.: s.n.], 2021.

WEI, L. et al. **Amorphous Bimetallic Oxide–Graphene Hybrids as Bifunctional Oxygen Electrocatalysts for Rechargeable Zn–Air Batteries.** v. 29. [S.l.: s.n.], 2017. P. 1701410. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201701410>. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201701410>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201701410>>.

YANG, X.-G. et al. **Asymmetric Temperature Modulation for Extreme Fast Charging of Lithium-Ion Batteries.** en. v. 3. [S.l.: s.n.], dez. 2019. P. 3002–3019. DOI: 10.1016/j.joule.2019.09.021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/misc/pii/S2542435119304817>>. Acesso em: 17 fev. 2022.

ZAPGO'S Ultrafast Charging, Carbon-Ion Technology Platform Featured in Prestigious Press. en. [S.l.: s.n.], set. 2019. Disponível em: <<https://www.businesswire.com/news/home/20190917005107/en/ZapGo%E2%80%99s-Ultrafast-Charging-Carbon-Ion-Technology-Platform-Featured-in-Prestigious-Press>>. Acesso em: 17 fev. 2022.