



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

YURI CHAVES DE LIMA

Modelagem de baterias de chumbo-ácido para sistemas de armazenamento de energia
aplicáveis junto ao sistema elétrico de potência

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

YURI CHAVES DE LIMA

Modelagem de baterias de chumbo-ácido para sistemas de armazenamento de energia aplicáveis junto ao sistema elétrico de potência

Trabalho apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo

Orientador

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L732m Lima, Yuri
 Modelagem de baterias de chumbo-ácido para sistemas de armazenamento de energia aplicáveis junto ao sistema elétrico de potência / Yuri Lima. - 2022.
 89 f. : il.
- Orientador: Marcel Ayres de Araujo.
 Inclui referências e apêndice(s).
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2022.
1. Armazenamento de energia. 2. Baterias. 3. Otimização. 4. Simulação. 5. sistema elétrico de potência . I. Araujo, Marcel Ayres de, orient. II. Título

CDD 621.3

YURI CHAVES DE LIMA

Modelagem de baterias de chumbo-ácido para sistemas de armazenamento de energia aplicáveis junto ao sistema elétrico de potência

Trabalho apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: 11/10/22.

Banca examinadora

Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo, UACSA, UFRPE
Orientador

Prof. Me. Vinícius de Cillo Moro, UFMT
Examinador

Prof. Dr. Fernando Gonçalves de Almeida Neto, UFRPE
Examinador

DEDICATÓRIA

Todo o meu trabalho dedico aos meus pais, em especial minha mãe que sempre se esforçou e lutou para que hoje eu possa concluir o meu curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu e me deu forças para superar todos os obstáculos que apareceram durante minha formação acadêmica, aos meus pais que se esforçaram ao máximo para me proporcionar a melhor educação possível e me ajudaram nos momentos mais difíceis que já passei e aos meus professores que me orientaram e guiaram para ter um melhor desempenho no meu processo de formação ao longo do curso.

RESUMO

Sistemas de armazenamento de energia apresentam diferentes formas e configurações, podendo ser da forma elétrica, térmica, de recursos energéticos ou naturais, os quais necessitam de um mecanismo adequado de conversão dessa energia armazenada. Por englobar uma extensa área de aplicações, os estudos das tecnologias de armazenamento de energia ganharam destaque, e seu emprego em conjunto com o sistema elétrico têm se intensificado por tornar o fornecimento de energia elétrica mais confiável, atendendo de maneira mais racional os consumidores. O crescente uso de sistemas de armazenamento de energia por baterias tem impulsionado novas pesquisas por modelos matemáticos representativos do comportamento dinâmico da operação de carga/descargas de baterias, com foco em otimizar seus recursos energéticos. Este trabalho objetiva o estudo e implementação de um modelo matemático utilizando ferramentas computacionais para simular o comportamento de uma bateria de chumbo-ácido tendo em vista a crescente inserção de armazenamento de energia junto a geração distribuída no sistema elétrico. Para tanto, focando-se em baterias de chumbo-ácido, foram pesquisados modelos matemáticos levando em consideração sua complexidade computacional, nível de representatividade do comportamento dinâmico da bateria, e exatidão de resultados. Foi selecionado o modelo Jackey por pautar seu equacionamento em um circuito elétrico visando a influência de parâmetros fundamentais como tensão de circuito aberto, resistência, capacitância, estado de carga da bateria, e temperatura do eletrólito. A partir destas implementações computacionais, como resultado foram obtidas as curvas características da bateria chumbo-ácido, cuja comparação com curvas experimentais apresentou um erro menor que 1%, evidenciando a eficácia do método desenvolvido e implementado.

Palavras-chave: armazenamento de energia, baterias, otimização, simulação, sistema elétrico de potência

ABSTRACT

Energy storage systems have different forms and configurations, which can be electrical, thermal, energy resources or natural, which require an adequate mechanism for converting this stored energy. As it encompasses an extensive area of applications, studies of energy storage technologies have gained prominence, and their use in conjunction with the electrical system has intensified by making the supply of electrical energy more reliable, serving consumers more rationally. The increasing use of battery energy storage systems has driven new research on mathematical models representing the dynamic behavior of battery charge/discharge operation, with a focus on optimizing their energy resources. This work aims at the study and implementation of a mathematical model using computational tools to simulate the behavior of a lead-acid battery in view of the increasing insertion of energy storage together with distributed generation in the electrical system. Therefore, focusing on lead-acid batteries, mathematical models were researched taking into account their computational complexity, level of representativeness of the dynamic behavior of the battery, and accuracy of results. The Jackey model was selected because its equation was based on an electrical circuit aiming at the influence of fundamental parameters such as open circuit voltage, resistance, capacitance, battery charge state, and electrolyte temperature. From these computational implementations, as a result, the characteristic curves of the lead-acid battery were obtained, whose comparison with experimental curves presented an error smaller than 1%, evidencing the effectiveness of the method developed and implemented.

Keywords: energy storage, batteries, optimization, simulation, electric power system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Principais tecnologias de armazenamento.	15
Figura 2 — Capacidade mundial instalada de armazenamento de energia elétrica.	17
Figura 3 — Esquema de usina hidrelétrica reversível em circuito fechado	18
Figura 4 — Componentes de um sistema CAES.....	21
Figura 5 — Representação de um sistema FES.....	22
Figura 6 — Sistema de operação de armazenamento de energia com baterias.....	24
Figura 7 — Funcionamento de uma bateria de lítio	25
Figura 8 — Bateria de fluxo redox.....	26
Figura 9 — Componentes básicos de uma bateria VRLA.....	29
Figura 10 — Curva de Peukert.....	36
Figura 11 — Modelo de bateria Ceraolo	41
Figura 12 — Modelo da bateria de Duval	42
Figura 13 — Circuito equivalente de Thevenin.	43
Figura 14 — Modelo baseado em impedância	43
Figura 15 — Modelo baseado em tempo de execução.....	44
Figura 16 — Célula de chumbo-ácido.....	45
Figura 17 — Diagrama de fluxo do modelo.....	47
Figura 18 — Modelo da bateria.....	47
Figura 19 — Diagrama da estrutura do modelo da bateria.....	48
Figura 20 — Circuito equivalente do modelo	49
Figura 21 — Circuito equivalente simplificado da bateria de chumbo-ácido utilizando fonte de corrente	51
Figura 22 — Estado de carga em função da tensão de circuito aberto.....	55
Figura 23 — Modelo simplificado da bateria de chumbo-ácido no instante inicial.....	57
Figura 24 — Curva de descarga a uma corrente constante de 100 A.....	58
Figura 25 — Curva de descarga a uma corrente constante de 50 A.....	58
Figura 26 — Curva de descarga a uma corrente constante de 10 A.....	59
Figura 27 — Curva de descarga a uma corrente constante de 3,15 A.....	59
Figura 28 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 100A.....	63
Figura 29 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 50A.....	64
Figura 30 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 10A.....	64

Figura 31 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 3,15 A.....	65
Figura 32 — Variação do parâmetro A0	66
Figura 33 — Variação do parâmetro R10	67
Figura 34 — Variação do parâmetro C1	68
Figura 35 — Variação do parâmetro k	69
Figura 36 — Variação do parâmetro R00	70
Figura 37 — Circuito equivalente do modelo no ambiente Simulink.....	72
Figura 38 — Circuito de temperatura do eletrólito	73
Figura 39 — Variação de Kt com a temperatura.....	75
Figura 40 — Ambiente de calibração da bateria	76
Figura 41 — Corrente de descarga constante 10 A	76
Figura 42 — Curva de descarga com 10 A	77
Figura 43 — Conjunto responsável por injetar corrente no modelo.	77
Figura 44 — Conjunto térmico externo da bateria	78
Figura 45 — Conjunto de medição.....	78
Figura 46 — Curva de tensão antes do processo de otimização	79
Figura 47 — Curva de tensão após o processo de otimização	80
Figura 48 — Curva do estado de carga	80
Figura 49 — Curva da temperatura	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Usinas reversíveis instaladas no Brasil.....	19
Tabela 2 — Comparação das características dos sistemas de armazenamento de energia.	30
Tabela 3 — Opções e aplicações das tecnologias de armazenamento de energia.....	31
Tabela 4 — Melhores valores para os parâmetros desconhecidos	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BESS	Energy Storage Battery System
CA	Corrente Alternada
CAES	Compressed Air Energy Storage
CC	Corrente Contínua
CFD	Computational Fluid Dynamics
DAE	Differential-Algebraic Equation
DLC	Double-layer Capacitor
DOC	Depth of Charge
EMC	Equivalent circuit model
FC	Hydrogen Fuel Cells
FES	Flywheel Energy Storage
GMG	Grupos Motor-Gerador diesel
HTSC	High Temperature Superconductor
NDF	Numerical Differentiation Formula
OCV	Open-Circuit Voltage
ODE	Ordinary Differential Equation
PHS	Pumped Hydro Storage
REI	Redes Eléctricas Inteligentes
SEP	Sistema Eléctrico de Potência
SLI	Starting Lighting and Ignition
SMES	Super-Conductive Magnetic Energy Storage
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
TES	Thermal Energy Storage
VC	Tensão Constante
VRLA	Valve Regulated Lead Acid battery

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	BOMBEAMENTO HIDRÁULICO.....	17
2.2	COMPRESSÃO DE AR	19
2.3	VOLANTES DE INERCIA	21
2.4	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS	23
2.4.1	Baterias de Li-íon	24
2.4.2	Bateria de fluxo redox.....	26
2.4.3	Bateria de chumbo-ácido	27
2.5	ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO	29
2.6	APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	30
3	MODELOS MATEMÁTICOS DAS BATERIAS	35
3.1	DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DAS BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO....	35
3.1.1	Capacidade.....	35
3.1.2	Tensão de circuito aberto (VOC).....	37
3.1.3	Tensão de corte	37
3.1.4	Taxa de carga e descarga.....	37
3.1.5	Força eletromotriz.....	37
3.1.6	Estado de carga (SOC) e profundidade de carga (DOC).....	37
3.1.7	Vida útil da bateria.....	38
3.1.8	Resistência interna	38
3.1.9	Estado de saúde	39
3.1.10	Autodescarga	40
3.2	PRINCIPAIS MODELOS MATEMÁTICOS.....	40
3.2.1	Modelo Ceraolo.....	40
3.2.2	Modelo de Duval.....	41
3.2.3	Modelo de Casacca, Salameh e Lynch.....	42
3.2.4	Modelo de Esfahanian, Torabi e Mosahebi.....	44

3.2.5	Modelo de Shepherd-Schiffer	46
3.2.6	Modelo de Jackey	47
4	MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS – MODELO JACKEY NO AMBIENTE MATLAB®	51
4.1	CONSIDERAÇÕES NO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MODELO	51
4.2	EQUAÇÃO DE MODELAGEM DA BATERIA	52
4.2.1	Cálculo dos parâmetros E_{mo} e K_E	54
4.2.2	Cálculo do parâmetro SOC	56
4.2.3	Cálculo do parâmetro R_{00}	56
4.3	ENSAIO EXPERIMENTAL DE DESCARGA DA BATERIA.....	57
4.4	RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DA BATERIA.....	60
4.5	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO	62
4.6	COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DA BATERIA.....	65
4.6.1	Parâmetro A_0	65
4.6.2	Parâmetro R_{10}	66
4.6.3	Parâmetro τ_1	67
4.6.4	Parâmetro k	68
4.6.5	Parâmetro R_{00}	69
5	MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS – MODELO JACKEY NO AMBIENTE SIMULINK	71
5.1	CIRCUITO PRINCIPAL DO MODELO.....	71
5.2	MODELAGEM TÉRMICA DA BATERIA	73
5.2.1	Massa Térmica.....	74
5.2.2	Fonte de fluxo de calor ideal.....	74
5.2.3	Referência térmica	74
5.2.4	Sensor de temperatura ideal.....	74
5.2.5	Bloco PS(1D)	74
5.3	AMBIENTE DE CALIBRAÇÃO DA BATERIA	75
5.4	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

Uma das premissas operacionais principais do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é a necessidade constante de equilibrar a relação entre oferta e a demanda de energia elétrica para atendimento de todos os consumidores. Contudo, os operadores do sistema muitas vezes necessitam recorrer a reservas de geração convencional, sobretudo de origem hidráulica e térmica no Brasil, para atender às mudanças na demanda.

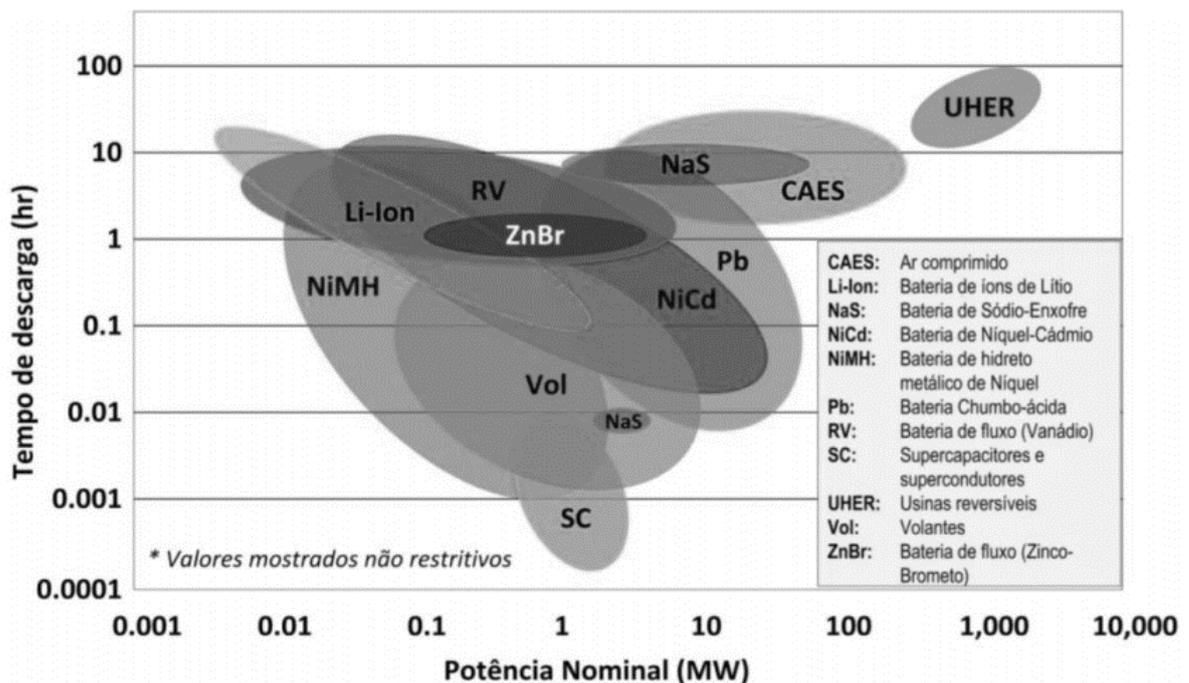
Além disso, com o desenvolvimento econômico e industrial dos países, e consequente aumento da demanda de energia, aliados à crescente preocupação com o meio ambiente e a mudanças climáticas, as fontes de geração de energia renovável têm ganhado destaque em substituição ao uso de combustíveis fósseis, os quais são responsáveis por cerca de 70% das emissões de poluentes mundiais na atmosfera (BAZAN, 2018). Somado a estes fatos, dentro do contexto da aplicação dos conceitos de Redes Elétricas Inteligentes (REI), ou *Smart Grids*, cujo foco está na integração de infraestruturas elétricas e de comunicações com sistemas de monitoramento, controle, automação e tecnologia da informação, buscam-se melhorias na qualidade, confiabilidade e continuidade da energia fornecida. A partir da implantação das REIs também se objetiva maior sustentabilidade e eficiência energética pelo emprego distribuído de fontes renováveis, otimização de recursos, aumento da produtividade da geração, armazenamento do excedente de energia e gerenciamento operacional, visando reduzir perdas com geração, transmissão e distribuição (ARAÚJO, 2017).

Nesta conjuntura, os sistemas de armazenamento de energia podem ser utilizados para melhorar a operação dos SEPs frente às redes elétricas modernas em situações com uma matriz híbrida e renovável de geração, cuja intermitência é significativa, em diferentes cenários de demanda e horizontes temporais do sistema elétrico. Dessa forma, os sistemas de armazenamento podem contribuir de maneira abrangente para o suprimento ininterrupto de energia, a autonomia de pequenos sistemas de geração e/ou plantas com geração renovável, a gestão de energia de reservas, o aumento da segurança no abastecimento de energia, e a melhoria da qualidade do produto e do serviço.

Os sistemas de armazenamento de energia referem-se a armazenamento em diferentes formas de acordo com a adequação da sua aplicação, podendo ser elétrico, térmico, químico ou naturais etc., os quais requerem um mecanismo adequado de conversão da energia armazenada. Os sistemas e/ou equipamentos de armazenamento de energia são caracterizados pela quantidade máxima de energia que são capazes de armazenar e dispor para uso posterior, pela taxa máxima com a qual a energia armazenada pode ser convertida e utilizada e pelo tempo

máximo de fornecimento desta energia armazenada, dado pela relação entre a energia armazenada e a potência com a qual o dispositivo opera. Para exemplificar são apresentadas na Figura 1 alguns dos principais tipos de tecnologias de armazenamento de energia, relacionando seus valores típicos de potência nominal e o tempo de descarga, por meio da qual se sobressai o *Pumped Hydro Storage*, armazenamento por bombeamento de água em usinas hidrelétricas reversíveis, com maior tempo de descarga e alta capacidade de armazenamento (SERRA *et al.*, 2016). Além dele, tem destaque o comportamento das baterias eletroquímicas, sobressaindo-se em relação às formas de armazenamento mecânicas como volante de inércia e ar comprimido, principalmente em relação ao tempo necessário para a sua descarga.

Figura 1 — Principais tecnologias de armazenamento.



Fonte: (SERRA *et al.*, 2016)

Pensando nisso, esse trabalho busca o estudo e a implementação de um modelo matemático utilizando ferramentas computacionais para simular o comportamento de uma bateria de chumbo-ácido, tendo em vista a crescente inserção de armazenamento de energia junto à geração distribuída no sistema elétrico. Focando na utilização de baterias de chumbo-ácido pelo seu tempo de mercado e considerando sua complexidade computacional, nível de representatividade do comportamento dinâmico da bateria, e exatidão de resultados, essa pesquisa identifica os desafios, requisitos e benefícios das principais tecnologias de

armazenamento de energia aplicáveis junto ao sistema elétrico de potência, possibilitando o estudo e a escolha de um modelo matemático que descreva o seu comportamento propiciando sua utilização na rede elétrica. Foi selecionado o modelo Jackey por pautar seu equacionamento em um circuito elétrico visando a influência de parâmetros fundamentais como tensão de circuitos aberto, resistência, capacitância, estado de carga da bateria, e temperatura do eletrólito. Para implementação do modelo matemático foi utilizado o software MATLAB® e a plataforma *Simulink* direcionando sua integração com modelos de sistemas elétricos e geração fotovoltaica. Foi implementado por meio de códigos no MATLAB® e blocos do *Simulink* o circuito equivalente do modelo com as equações que descrevem o seu comportamento, além de ser adicionado na simulação feita no Simulink um modelo térmico para analisar o seu desempenho diante da variação de temperatura na bateria. Pelo fato de o modelo apresentar uma relação de interdependência de alguns parâmetros e dados, alguns dos seus valores foram obtidos por processos de estimação de parâmetros e outros de forma direta a partir das equações obtidas pela simplificação do circuito elétrico do modelo da bateria.

Para tanto, a fim de alcançar os objetivos propostos a presente monografia fora organizada em seis capítulos como descrito a seguir.

No primeiro capítulo é apresentada uma visão geral sobre o armazenamento de energia, introduzindo conceitos relacionados ao Sistema Elétrico de Potência e como sistemas de armazenamento de energia podem auxiliar para o seu bom funcionamento.

No segundo capítulo são identificados os principais desafios, requisitos e benefícios das tecnologias de armazenamento de energia aplicáveis junto ao sistema elétrico de potência, comparando suas características, e a partir disso, elencando suas principais aplicações.

No terceiro capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos principais modelos, representações matemáticas e computacionais de baterias de chumbo-ácido, além de ser fundamentada a escolha do modelo matemático implementado no presente trabalho.

No quarto capítulo é implementada a análise do modelo escolhido por meio de linhas de código, fundamentando todo equacionamento matemático utilizado para a sua construção, de modo a facilitar a verificação de sua fidelidade às respostas teóricas esperadas nessa análise.

No quinto capítulo é implementado o modelo estudado no ambiente do Simulink, com o intuito de validar a modelagem matemática e torná-la aplicável e integrável em estudos conjuntos com modelos de sistemas elétricos.

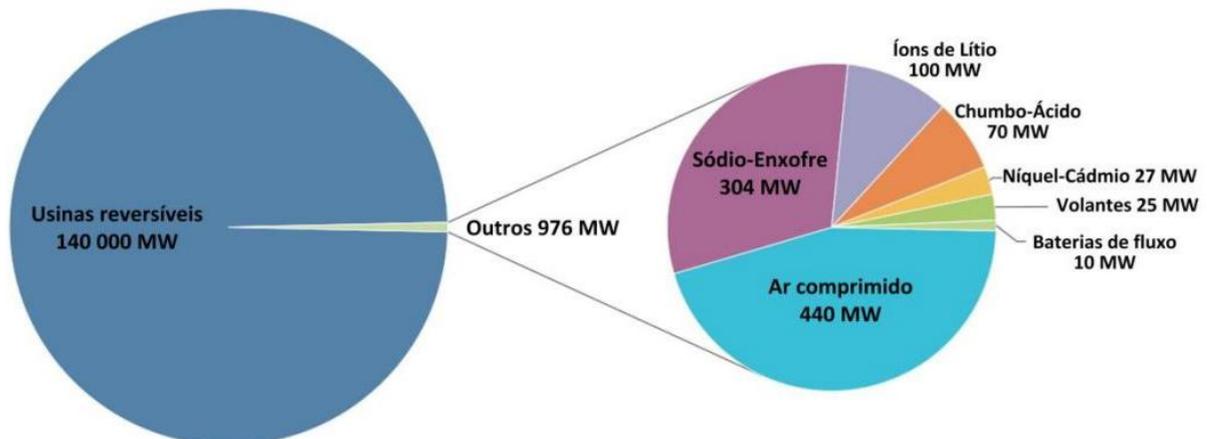
2 REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo serão apresentadas de forma sucinta as principais formas utilizadas para armazenar energia junto ao sistema elétrico de potência, que são: bombeamento hidráulico, compressão de ar, volantes de inércia, baterias de íons de lítio, de fluxo redox e de chumbo-ácido. Tendo em vista as suas definições e operações, é feito o comparativo entre suas características de densidade de energia e potência, sua energia e potência específica, potência nominal e a capacidade de armazenamento. Com essas informações é possível descrever as principais aplicações para cada tipo de armazenamento e os principais requisitos que o sistema de armazenamento para que a aplicação seja realizada.

2.1 BOMBEAMENTO HIDRÁULICO

O armazenamento de energia das usinas hidrelétricas reversíveis, ou armazenamento por bombeamento de água, *Pumped Hydro Storage*, é uma tecnologia baseada na maturidade da geração hidrelétrica tradicional. Em escala global, as aproximadamente 270 estações PHS somam uma geração de 161 GW (IHA, 2018), representando 99% da capacidade de armazenamento de eletricidade em escala de rede, contribuindo com aproximadamente 3% da geração elétrica mundial (NHA, 2017), como mostrado na Figura 2.

Figura 2 — Capacidade mundial instalada de armazenamento de energia elétrica.



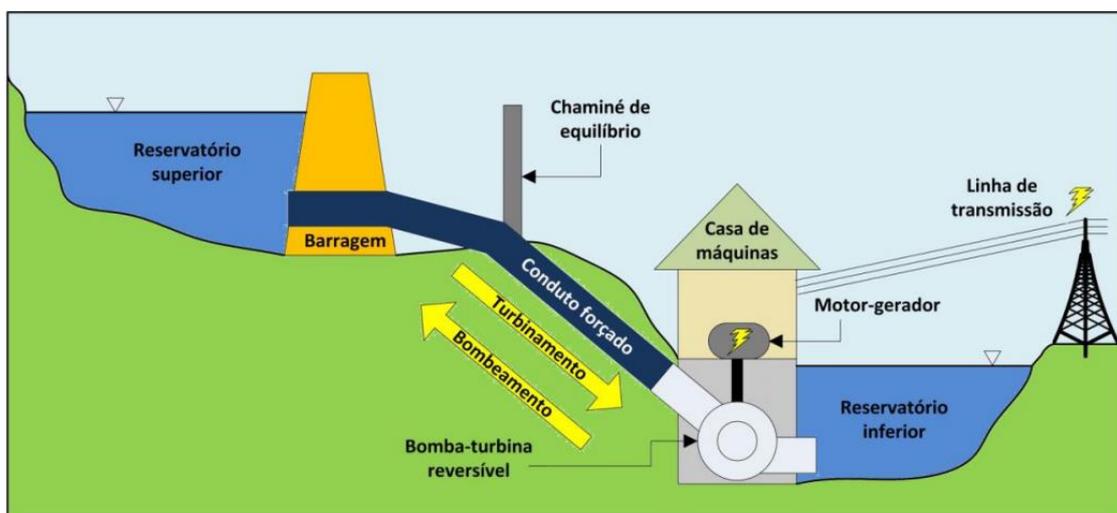
Fonte: IEA (2017)

Esse método consiste no bombeamento de água de um reservatório inferior para um reservatório superior utilizando a energia excedente durante períodos de alta geração, tornando possível a liberação da água bombeada e armazenada para movimentar as turbinas hidráulicas em períodos de pico de demanda, com eficiência na faixa de 75 a 85% (CHEN *et al.*, 2009).

Esse tipo de tecnologia é usado principalmente para o gerenciamento da energia produzida, sendo mais usada para o nivelamento de carga (*load leveling*), ideal para situações que exigem uma descarga profunda de energia, controle de frequência, reserva não girante e atendimento às demandas de pico (*peak shaving*) (LUO *et al.*, 2015). Sua operação é semelhante à de uma hidrelétrica tradicional, diferenciando-se pelo fato que a mesma água pode ser usada repetidamente, e como não utiliza combustão para geração de energia, torna menores seus custos operacionais.

Basicamente, existe três formas de construir esse tipo de usina para armazenamento de energia, o modelo em circuito fechado, circuito aberto e semiaberto (SERRA *et al.*, 2016). A configuração em circuito fechado (*closed loop*) é considerada a com menor impacto ambiental por ter um baixo consumo de água, já que possuem altas quedas e seus reservatórios são de pequeno porte. São utilizados dois reservatórios, que podem ser lagos artificiais ou naturais adaptados, mas nenhum deles são ligados a rios. Na Figura 3, observa-se esse modelo de configuração.

Figura 3 — Esquema de usina hidrelétrica reversível em circuito fechado



Fonte: (CANALES; BELUCO; MENDES, 2015, p. 1233)

Já a configuração em circuito aberto (*open loop*) utiliza dois reservatórios, sendo sua principal diferença em relação ao circuito fechado possuir pelo menos um reservatório a partir

de uma fonte natural de água. Durante períodos de baixa demanda de eletricidade, como a noite ou em finais de semana, é utilizada a energia excedente para bombear a água para o reservatório superior, e em períodos de alta demanda, essa água é liberada, rotacionando as turbinas e gerando eletricidade.

Por fim, na configuração em circuito semiaberto também são utilizados dois reservatórios, sendo um deles artificial e o outro uma fonte natural de água, como por exemplo o leito de um rio. O modo de formar os reservatórios depende das condições topográficas da região, podendo utilizar inundações, cavernas ou minas abandonadas como reservatório inferior, construção de bacias artificiais e barragens. Outra opção é utilizar as depressões naturais ou até mesmo a água do mar, como no caso da usina de Okinawa Yanbaru, inaugurado em 1999, no Japão. No Chile existem estudos para construção de uma usina reversível híbrida, que utiliza o mar como reservatório inferior e energia solar para o bombeamento da água para o reservatório superior (SERRA *et al.*, 2016).

Atualmente se tem 4 usinas reversíveis instaladas no Brasil, todas projetadas na primeira metade do século passado, operando principalmente como bombeamento e apresentando capacidade total inferior a 285 MW (CANALES; BELUCO; MENDES, 2015, p. 1244). Na Tabela 1, encontram-se indicadas essas usinas.

Tabela 1 — Usinas reversíveis instaladas no Brasil.

Nome	Inauguração	Equipamento projetado	Potência unitária das turbinas (MW)	Potência unitária das bombas (MW)	Altura de queda (m)
Edgard de Souza	1955	1 Francis reversível	14,8	13,30	24
Pedreira	1939	6 Francis reversíveis	13,1	7,10	25
Traição	1940	4 Kaplan reversíveis	1,83	2,35	4
Vigário	1952	4 Francis reversíveis	22,7	18,00	36

Fonte: (CANALES; BELUCO; MENDES, 2015, p. 1244).

2.2 COMPRESSÃO DE AR

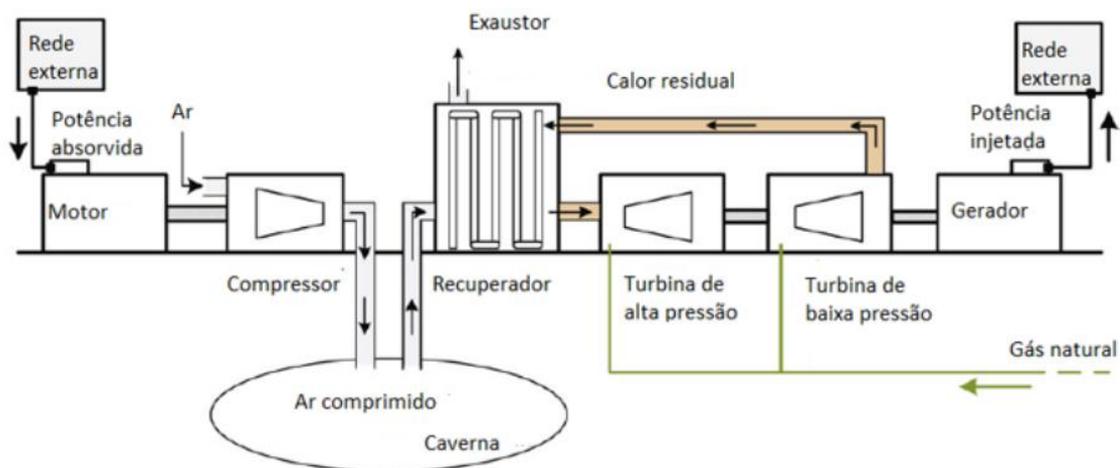
O interesse pelos sistemas de armazenamento por compressão de ar, *Compressed Air Energy Storage* (CAES), surgiu em decorrência da crise do petróleo nos anos de 1970, sendo aplicado pela primeira vez em 1978, na Alemanha, para armazenar a energia excedente produzida pelas usinas nucleares que operavam como base energética do país (SUCCAR; WILLIAMS, 2008, p. 22). O sistema se baseia na compressão do ar em cavernas subterrâneas

de rochas relativamente duras e impermeáveis, cavernas de sal e reservatórios porosos feitos por aquíferos, durante os períodos de eletricidade de baixo custo. Essa energia armazenada é liberada nos períodos de pico de demanda, em que a energia tem um custo mais elevado. Por meio de uma mistura com gás natural ou hidrogênio, o qual torna possível promover o aquecimento e combustão desse produto, a mistura de ar e gás passa por uma turbina de compressão, na qual é queimada para promover o acionamento de um gerador produzindo eletricidade.

Dentre as principais vantagens desse sistema estão os longos períodos de armazenamento, que podem ultrapassar um ano e o baixo tempo necessário para colocar o sistema em funcionamento, aproximadamente 7 a 15 minutos. Um sistema de compressão de ar é feito unindo componentes artificiais e formações geológicas naturais, para armazenar e produzir energia, como exemplificado na Figura 4.

Em comparação com os sistemas de bombeamento de água, essa tecnologia encontra-se na mesma faixa de potência e com eficiência entre 50 e 89%, apresentando uma densidade de energia armazenada de 50-60 Wh/kg, ultrapassando o sistema PHS. As principais aplicações dessa tecnologia são no remanejamento de cargas, redução de picos e no controle de frequência e tensão. O CAES também pode atuar juntamente com aplicações de energias renováveis intermitentes, especialmente em energia eólica, suavizando a instabilidade na tensão (SUCCAR; DENKENBERGER; WILLIAMS, 2012, p. 222). Esse sistema exige locais geograficamente adequados e um custo capital elevado, além de requerer o suprimento adicional com gases combustíveis para ter maior eficiência. Uma das principais desvantagens do CAES são as restrições ambientais, que além da dificuldade em encontrar formações geológicas compatíveis com a necessidade do sistema, ao aumentar a compressão de ar, podem eventualmente causar danos às estruturas geológicas vizinhas e à superfície da estrutura.

Figura 4 — Componentes de um sistema CAES



Fonte: (SILVA, 2018, p. 25)

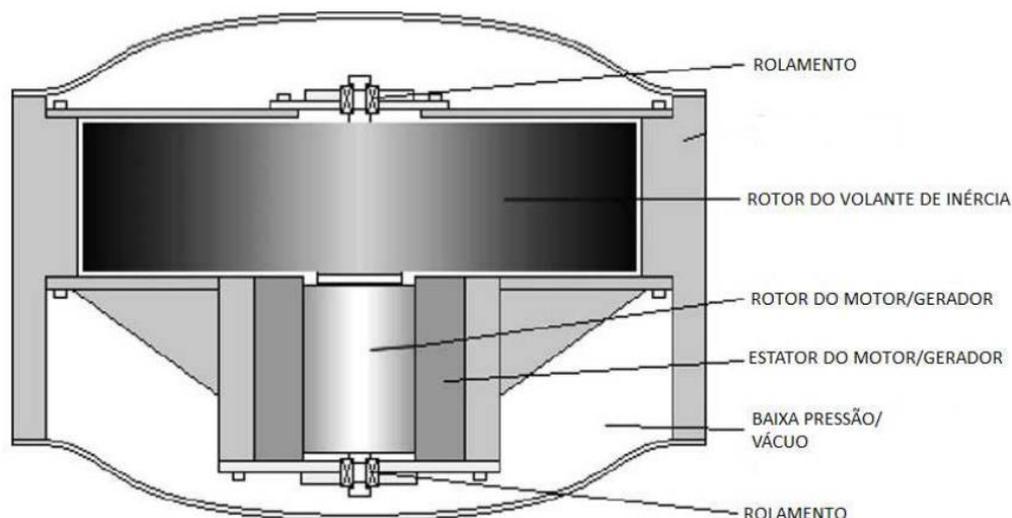
2.3 VOLANTES DE INERCIA

O sistema de armazenamento por volantes de inércia, *Flywheel Energy Storage (FES)*, baseia-se em uma tecnologia que utiliza o momento de inércia elevado de um motor ou gerador para o armazenamento de energia rotacional durante períodos em que o custo da eletricidade é baixo. A energia armazenada é consumida por meio da rápida desaceleração do rotor decorrente de perturbações no sistema que podem ser causadas por perdas de geração, o que afetaria diretamente a frequência do SEP.

Os principais componentes de um volante de inércia são o corpo, rolamentos e os dispositivos de transmissão (ALZOLA *et al.*, 2011, p. 2). A Figura 5 mostra de forma simplificada uma instalação moderna de FES, a qual utiliza energia elétrica para acelerar ou desacelerar o volante. Para reduzir as perdas por resistência do ar e atrito, o sistema FES pode ser colocado em alto vácuo. O sistema de armazenamento por volantes de inércia pode ser classificado de duas formas: alta velocidade e baixa velocidade.

O sistema de baixa velocidade utiliza tecnologia tradicional para sua construção, como o aço, para a composição do *flywheel*, permitindo rotacionar a uma velocidade de 6.000 rpm, sendo geralmente aplicado para curto e médio prazo em alta potência.

Figura 5 — Representação de um sistema FES



Fonte: Costa (2017)

Já o sistema de alta velocidade faz uso de materiais mais avançados para a construção do *flywheel*, tais como fibra de carbono, proporcionando atingir velocidades maiores, como 1.000.000 rpm (ALZOLA *et al.*, 2011, p. 2). Sua área de aplicação está continuamente em expansão, principalmente no que se refere à qualidade de energia e sistemas aeroespaciais (DÍAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2013). Os principais benefícios dessa tecnologia são a sua alta eficiência, que pode chegar a até 95% da potência nominal, sua densidade elevada de energia, fácil manutenção e não apresentar problemas em caso de descargas profundas (ALZOLA *et al.*, 2011, p. 4).

Atualmente a busca por melhorias dos sistemas FES está voltada para o desenvolvimento de materiais que aumentem a capacidade da velocidade de rotação e da densidade de energia do *Flywheel*. Um grande avanço dessa tecnologia se deu ao utilizar supercondutores de alta temperatura, *High Temperature Superconductor* (HTSC), interagindo o supercondutor e um ímã permanente a partir das características diamagnéticas do supercondutor, diminuindo as perdas do sistema e aumentando sua eficiência (PATRÍCIO, 2011).

Nessa linha de pesquisa, o Laboratório Nacional Argonne US desenvolveu um protótipo de um sistema de armazenamento de energia com 2 kWh usando supercondutores de alta temperatura e ímãs permanentes, demonstrando a redução de perdas com uma alternativa econômica e competitiva para a expansão da capacidade de produção de energia (MULCAHY *et al.*, 2001).

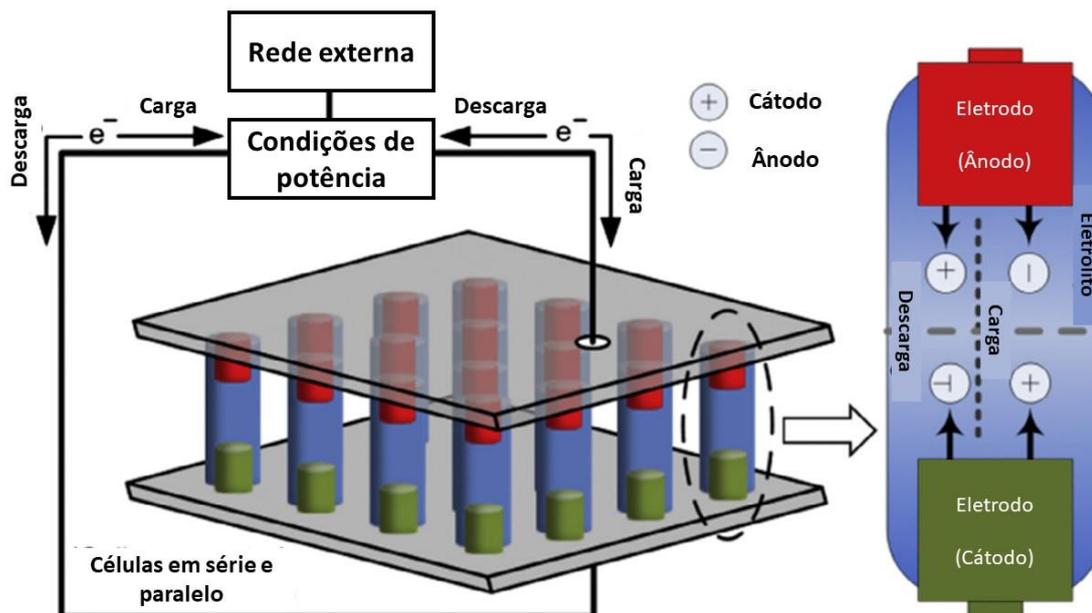
2.4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS

O armazenamento de energia por baterias, *Battery Energy Storage* (BES), consiste na distribuição em série ou em paralelo de células eletroquímicas responsáveis por produzir energia elétrica por meio de reações químicas. Cada célula é composta por dois eletrodos, ânodo e cátodo, e um eletrólito, que é uma solução líquida, sólida ou viscosa que permite a passagem de elétrons, com ilustrado na Figura 6. Em uma célula é possível converter energia entre energia elétrica e química, o que a torna recarregável, sendo a tecnologia mais amplamente utilizada na indústria e na vida diária. No processo de descarga da bateria, as reações eletroquímicas ocorrem simultaneamente nos ânodos e cátodos, já no circuito externo, os elétrons são fornecidos a partir dos ânodos e coletados nos cátodos.

No processo de carregamento, as reações ocorrem de forma reversível e a bateria é recarregada com o auxílio de uma fonte de tensão externa para os dois eletrodos (LUO *et al.*, 2015). Atualmente, as baterias podem ser amplamente utilizadas em diversas aplicações, em destaque para a qualidade e gestão de energia. As principais dificuldades da aplicação dessa tecnologia ainda estão associadas ao seu baixo tempo de ciclismo, aos altos custos de manutenção e se sua composição apresentar materiais tóxicos, deve-se considerar sua eliminação e reciclagem.

Além disso, é necessário levar em consideração que grande parte das baterias não pode ser completamente descarregada, sendo fator decisivo no seu tempo de vida, dependendo do ciclo de profundidade de descarga (DÍAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2012).

Figura 6 — Sistema de operação de armazenamento de energia com baterias



Fonte: Adaptado de Luo *et al.* (2015).

As baterias além de serem caracterizadas a partir do processo químico envolvido no seu funcionamento, também possuem um desempenho elétrico que as diferenciam umas das outras, variando de acordo com a quantidade de associações de células, e sendo categorizadas pelos fabricantes a partir dos seus principais parâmetros, que são (MONTEIRO, 2019):

- Capacidade específica (Ah): a capacidade que uma bateria possui de fornecer uma corrente, por determinado tempo, até atingir sua tensão final em que é feito o descarregamento.
- Corrente Nominal (Adc): a corrente elétrica que a bateria pode fornecer a um determinado circuito.
- Tensão Nominal (Vdc): é a diferença de potencial que pode haver no processo de oxidação e redução no ânodo e cátodo (materiais ativos).
- Potência e Energia específicas (W e Wh): é a capacidade de potência nominal e de energia que uma bateria pode armazenar, respectivamente.

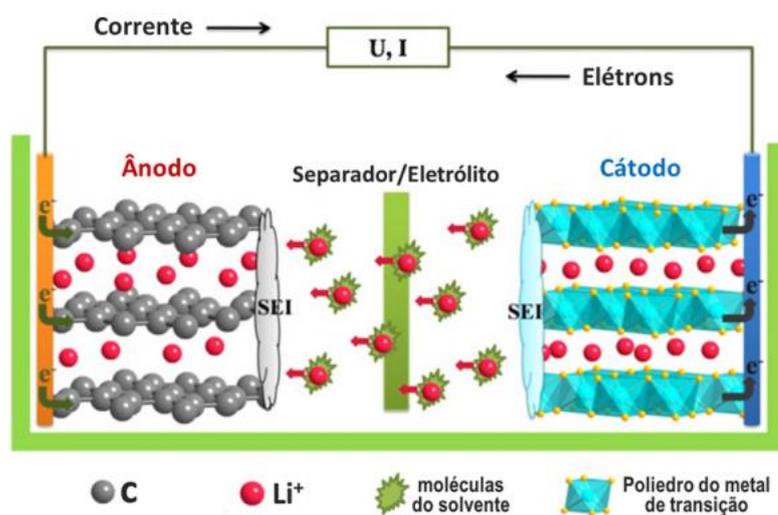
2.4.1 Baterias de Li-íon

Quimicamente uma bateria de íons de lítio é constituída com o seu cátodo formado por óxidos metálicos de lítio, como o $LiMO_2$ e o $LiCoO_2$, e o seu ânodo feito de carbono grafítico,

respectivamente eletrodos positivos e negativos, de forma que esta estrutura permite o transporte das cargas por meio dos íons (LUO *et al.*, 2015).

Há duas formas para o carregamento das baterias de Li-íon, sendo mais utilizada a de Corrente Constante/Tensão Constante (CC/VC). Neste método, a característica da bateria de permanecer como carga (recebendo energia) tem início com uma corrente constante a partir da tensão de corte da bateria, tensão entre 2,5 e 2,7 V, até o momento em que esta tensão de corte é uniformizada ou equalizada. É a partir daí que o modo de tensão constante entra em operação, sendo a tensão mantida constante, a redução ocorrerá na corrente até atingir 2% de sua capacidade. Assim que isso acontece, a tensão é reduzida para um novo valor chamado de flutuação, momento em que o processo de carga é encerrado e a bateria atinge então a carga nominal (COSTA *et al.*, 2018). Em seu funcionamento, no processo de carregamento, a energia necessária aplicada à bateria faz com que os íons se movam através do eletrólito que sai do cátodo para o ânodo, formando um circuito elétrico, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 — Funcionamento de uma bateria de lítio



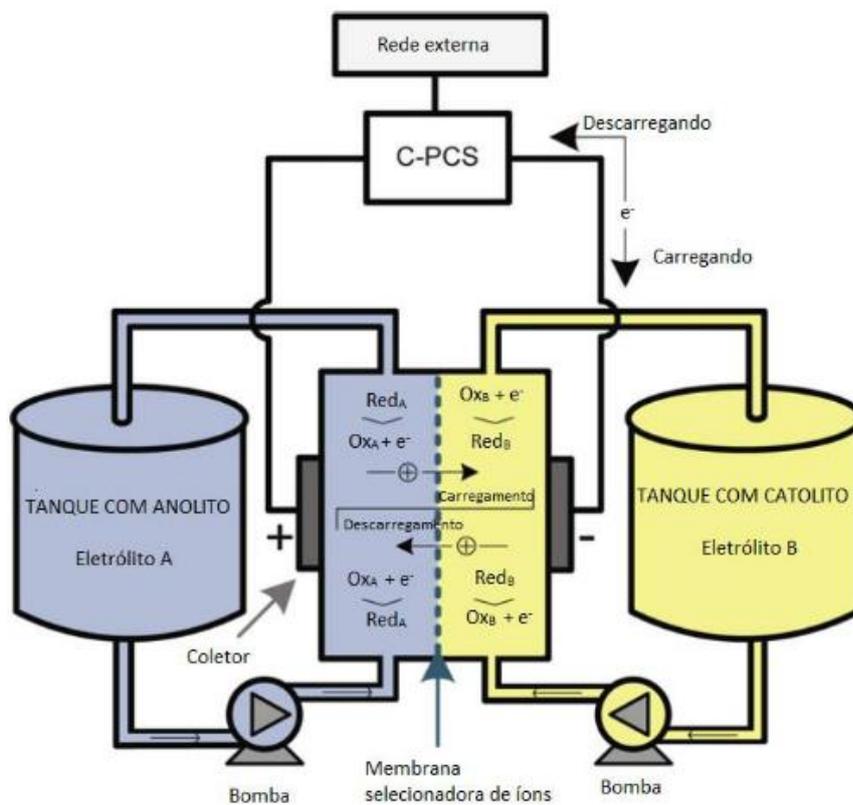
Fonte: (XU *et al.*, 2012)

Uma característica interessante das baterias de lítio é a utilização do carbono no ânodo, por ser um material encontrado em grandes quantidades na natureza e de baixo custo, diferenciando na questão do cuidado com o meio ambiente. Porém, há estudos e pesquisas para melhor aperfeiçoamento das baterias de lítio, no sentido de inovação nos materiais para serem substituídos no eletrodo negativo, como forma de melhorar as aplicações das baterias no sistema elétrico (NASCIMENTO, 2018).

2.4.2 Bateria de fluxo redox

A estrutura das baterias de fluxo redox é constituída de dois tanques separados que são preenchidos por soluções eletrolíticas condutoras de corrente elétrica, sendo uma positiva e a outra negativa. Estas soluções são bombeadas por tubos para uma célula de reação em que há uma solução eletrolítica desagregada por uma membrana semipermeável, necessária para a troca de íons entre elas. Tal característica induz na membrana um fluxo de corrente que circula até a carga, como representado na Figura 8. Algumas baterias de fluxo, como as de zinco-bromo (ZnBr), possuem, em comparação com as citadas anteriormente, o aspecto de apresentar uma longa duração no armazenamento de energia, fato que lhes confere custos mais baixos quando comparados aos das baterias de lítio (SILVA; BORTONI, 2016).

Figura 8 — Bateria de fluxo redox

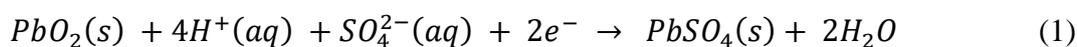


Fonte: (SILVA, 2018, p. 30)

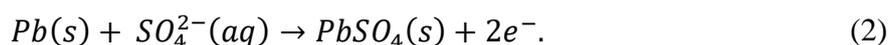
2.4.3 Bateria de chumbo-ácido

Quando o peso é irrelevante para a aplicação, as baterias de chumbo-ácido se tornam as mais econômicas (US\$300-600/kWh) e amplamente utilizadas com eficiência de 70-90% (CHEN *et al.*, 2009). Sua finalidade é transformar energia química em energia elétrica e vice-versa, sendo seu processo de transformação reversível, permitindo a bateria ser carregada e descarregada diversas vezes. Esse processo pode ser representado pelas equações químicas 1, 2 e 3 (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000).

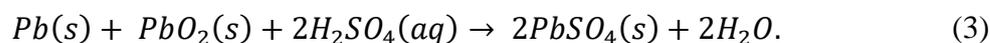
Na equação 1, o dióxido de chumbo no cátodo reage com o ácido sulfúrico durante o processo de descarga, produzindo sulfato de chumbo e água:



Já no anodo, o chumbo reage com os íons de sulfato formando o sulfato de chumbo, como mostrado na equação 2:



A reação global apresenta como produto somente o sulfato de chumbo e água, como mostrado na equação 3:



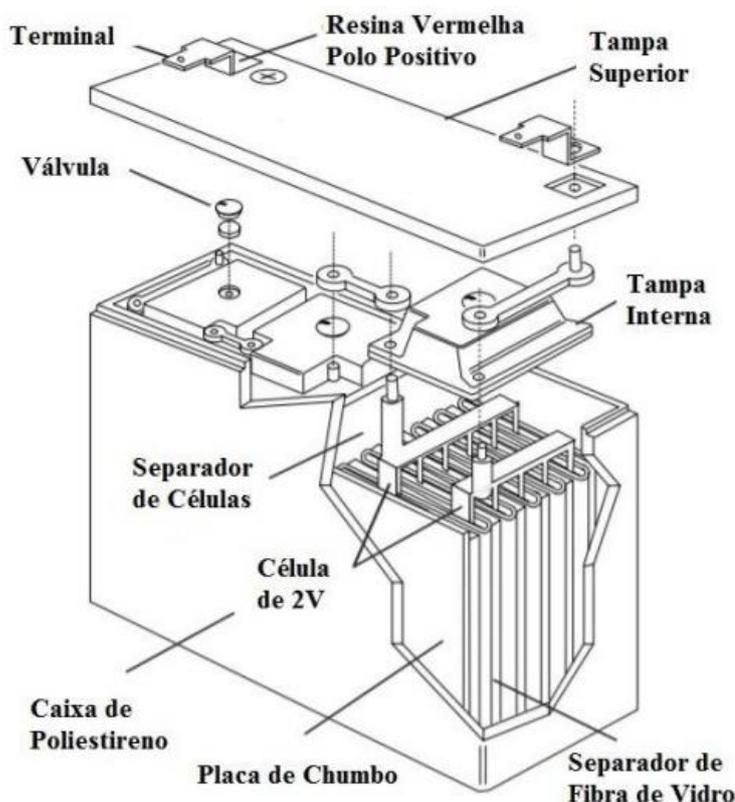
As baterias de chumbo-ácido recebem quatro diferentes classificações, a saber (CARNEIRO *et al.*, 2017):

- **Bateria de arranque:** as baterias de arranque, também chamadas de *Starting Lighting and Ignition* (SLI) ou automotivas, são as responsáveis por fornecer energia suficiente para iniciar a combustão interna do motor e para alimentar o sistema elétrico do veículo quando não estiver em funcionamento. Esse tipo de bateria pode ser classificado em duas diferentes subdivisões, que são as baterias ventiladas e as baterias seladas.
- **Baterias tracionárias:** esse tipo de bateria é usado em aplicações sob condições mais severas, nas quais é necessária uma maior potência, energia e um ciclo de vida

longo. Comparadas com as baterias de arranque, a descarga das baterias tracionarias necessita ser muito maior, pois precisa obter mais energia, tornando seus ciclos de descarga muito profundos, e suas recargas precisam ser em um curto espaço de tempo.

- **Baterias estacionárias:** esse tipo de bateria é usado como fonte de reserva de energia, na maior parte do tempo trabalha carregada e quando solicitada substitui a fonte de energia interrompida do sistema ou equipamento, suprimindo o seu funcionamento. Observa-se essa aplicação em subestações, sistemas de emergência, alimentação auxiliar de hospitais, *No breaks*, iluminação de emergência, alarmes, entre outras aplicações que necessitem de um sistema de reserva de energia (CARNEIRO *et al.*, 2017). Nesse tipo de bateria, são utilizadas placas mais espessas, com alta densidade de massa e maior quantidade de eletrólito, de modo a prolongar a sua vida útil.
- **Baterias VRLA:** essa bateria é considerada de última geração por ser desenvolvida de modo a diminuir a necessidade de manutenção, não sendo necessário completar com água. Este tipo de bateria possui um ciclo de recombinação entre o hidrogênio e o oxigênio gerados na reação de redox, os quais se combinam ao invés de serem perdidos no ambiente. Caso a quantidade de gases em seu interior excedam os limites de segurança, uma válvula existente irá se abrir e eliminar o excesso de gases produzidos, reestabelecendo a pressão de trabalho da bateria. Pode-se classificar as baterias VRLA em baterias de gel, em que o eletrólito é misturado em partículas de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), resultando em uma consistência gelatinosa, e as baterias AGM (*Absorbed Glass Mat*), que possuem um rendimento superior quando comparadas com as dos outros modelos. Independente do modelo ou fabricante, as baterias de chumbo-ácido compartilham, basicamente, os mesmos componentes, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 — Componentes básicos de uma bateria VRLA.



Fonte: S.T.A. Sistemas e Tecnologia Aplicada

2.5 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO

Analisando a Tabela 2 em conjunto com a Figura 1, verifica-se que o tempo de resposta dos sistemas PHS e CAES é lento, mas apresentam um tempo de descarga elevado de algumas horas, de modo a conseguir fornecer energia por um longo período. Essas características do PHS e do CAES os tornam propícios para aplicações voltadas a gestão de energia, tais como o nivelamento de carga e a gestão em horários de ponta. Os sistemas FESS (*Flywheel Energy Storage System*), DLC (*Double-layer Capacitor*) e SMES (*Super-Conductive Magnetic Energy Storage*) apresentam um tempo de resposta e descarga curto, sendo possível fornecer uma elevada quantidade de potência em um curto intervalo de tempo. Para essas características, a aplicação em serviços de regulação de frequência e controle de tensão se tornam indicadas. Já o BESS (*Battery Energy Storage System*) e o FC (*Hydrogen Fuel Cells*), apresentando tempo de resposta e tempo de descarga intermediários, sendo indicados para aplicações em funções de suporte à operação de sistemas elétricos, como o fornecimento de reserva girante e seguimento de carga.

Tabela 2 — Comparação das características dos sistemas de armazenamento de energia.

Tecnologia	Densidade de Energia (Wh/l)	Densidade de Potência (W/l)	Energia Específica (W/Kg)	Potência Específica (W/Kg)	Potência Nominal (MW)	Capacidade de Armazenamento (MWh)
PHS	0,2 - 2	0,1 - 0,2	0,5 - 1,5	-	<4000	0,0005 - 24000
FESS	20 - 80	5000	5 - 70	-	0,1 - 20	0,0052 - 5
CAES	2 - 6	0,2 - 0,6	10 - 30	-	20 - 500	400 - 7000
PbA	50 - 80	90 - 700	20 - 45	75 - 300	0,05 - 40	0,001 - 40
Li-ion	200 - 400	1300 - 10000	75 - 200	150 - 315	0,1 - 100	~0,004 - 10
NiCd	15 - 80	75 - 700	40 - 70	150 - 300	<40	~6,75
NiMH	80 - 200	500 - 3000	60 - 80	~70	0,001 - 1	-

Fonte: Adaptado de Silva (2015)

2.6 APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os estudos de tecnologias de armazenamento de energia nos últimos anos vêm sendo amplamente relatados, abrangendo uma extensa gama de aplicações, que incluem suporte a operações estáveis e seguras de sistemas elétricos, podendo desempenhar funções de gestão de energia, garantindo a utilização racional de energia elétrica e redução do seu custo. Os diversos sistemas de armazenamento de energia podem ser integrados em vários níveis estruturais do sistema elétrico por possuírem características de operação que podem durar de segundos a dias, atuando no nível de geração, transmissão, distribuição e no nível do consumidor final. As aplicações dos sistemas de armazenamento de energia podem ser divididas em 4 grupos distintos, cada um com suas particularidades (BUENO; BRANDÃO, p 29). Esses grupos são:

- Deslocamento da energia no tempo: também conhecido como arbitragem, consiste em comparar os preços da energia elétrica em horários de ponta e fora de ponta e obter vantagem dessa diferença. A energia em horário fora de ponta é armazenada para a utilização no horário de ponta. Atualmente, esse artifício de utilização de armazenamento possui um volume significativo de clientes, gerando sua própria energia no horário de ponta por meio de Grupos Motor-Gerador diesel (GMG).
- Capacidade adicional de fornecimento: um sistema de armazenamento de energia pode ser utilizado para evitar a ampliação de uma rede de suprimento a uma carga, adiando investimentos em reforço. Caso uma carga demande uma potência elevada em um curto intervalo (até algumas horas), pode ser utilizado um sistema de

armazenamento de energia para suprir a energia adicional durante esse período, de modo a evitar uma ampliação da rede ou reforço do sistema elétrico.

- Integração de renováveis - geração intermitente: sistemas de geração distribuída, principalmente baseados em fontes solares e eólicas, apresentam interferências devido à fonte primária, ou seja, em momentos sem vento ou sem sol. Para corrigir esse problema, são utilizados sistemas de armazenamento de energia que atuam de modo a tornar a curva de geração mais plana ou até mesmo suprir a energia por pequenos intervalos em que a geração estiver indisponível.
- Serviços suplementares: o sistema de armazenamento de energia pode ser utilizado em uma gama de aplicações no Sistema Elétrico de Potência, tanto para aumentar a estabilidade dinâmica e a capacidade de suprimento, como para aumentar a confiabilidade do sistema. Entre as principais aplicações com essas características, destacam-se o controle de tensão e de frequência e a reserva girante/reserva suplementar.

Para simplificar a análise, a Tabela 3 apresenta resumidamente as opções e as principais aplicações das formas de armazenamento de energia, abordando suas principais especificações.

Tabela 3 — Opções e aplicações das tecnologias de armazenamento de energia (continua)

Área de aplicação	Características e especificações da aplicação	Opções de tecnologias
Qualidade de energia	< 1 MW, tempo de resposta na grandeza de milissegundos e tempo de descarga de milissegundos a segundos	Volantes de inércia, baterias, capacitores e supercapacitores Grande: PHS, CAES, TES
Gestão de energia	Grande (>100 MW), médio/pequeno (1-100 MW), tempo de resposta (minutos), duração de descarga (horas-dias)	Pequeno: Baterias, baterias de fluxo, TES
Integração de suavização de renováveis intermitentes	Até 20 MW, tempo de resposta (normalmente até 1 s, <1 ciclo), duração de descarga (minutos a horas)	Volantes de inercia, baterias e supercapacitores
Integração renovável para backup	100 KW – 40 KW, tempo de resposta (segundos a minutos), duração de descarga (até dias)	Baterias e baterias de fluxo
Energia de backup de emergência	Até 1 MW, tempo de resposta (milissegundos a minutos), duração (até 24h)	Baterias, volantes de inercia, baterias de fluxo
Backup de telecomunicação	Até alguns KW, tempo de resposta (milissegundos), duração de descarga (minutos a horas)	Baterias
<i>Ramping and load following</i>	De MW a centenas de MW, tempo de resposta (até 1 s), duração de descarga (minutos a horas)	Baterias, baterias de fluxo e SMES
<i>Time shifting</i> ou deslocamento de energia	1–100 MW, tempo de resposta (Minutos), duração de descarga (3-12h)	PHS, CAES e baterias

Área de aplicação	Características e especificações da aplicação	Opções de tecnologias
<i>Peak shaving</i>	100 kW-100kW, tempo de resposta (minutos), duração de descarga (<10h)	PHS, CAES e baterias
Nivelamento de carga	Até várias centenas de MW, tempo de resposta (minutos), duração de descarga (mais de 12h)	PHS, CAES e baterias
Armazenamento de energia sazonal	Gerenciamento de energia (30-500 MW), duração de descarga de armazenamento a longo prazo (até semanas), tempo de respostas (minutos)	PHS, TES e células combustíveis. Possível em: CAES e combustíveis solares em larga escala
<i>Low voltage ride through</i>	Normalmente inferior a 10 MW, tempo de resposta (milissegundos), duração de descarga (até minutos)	Volantes de inercia e baterias
Transmissão e distribuição	Até 100 MW, tempo de resposta (milissegundos, <1/4 ciclos), duração da descarga (milissegundos)	Baterias e SMES
Black-Start	Até 40 MW, tempo de resposta (minutos), duração de descarga (segundos a horas)	CAES de pequenas escalas, baterias e baterias de fluxo
Regulação e controle de tensão	Até alguns MW, tempo de resposta (milissegundos), duração de descarga (até minutos)	Baterias e baterias de fluxo
Supressão de flutuação de rede	Até o nível de MW, tempo de resposta (milissegundos), duração de descarga (até minutos)	Baterias, baterias de fluxo, SMES, capacitores e supercapacitores
Reserva girante	Até o nível de MW, tempo de resposta (até alguns segundos), duração de descarga (30 minutos a algumas horas)	Baterias
Aplicações em transporte	Até 50 KW, tempo de resposta (milissegundos a segundos), duração de descarga (segundos a horas)	Baterias, células combustíveis e supercapacitores
Confiabilidade do serviço	Até 1 MW, tempo de resposta (milissegundos, <1/4 ciclo), tempo de armazenamento em capacidade nominal (0,08 – 5h)	Baterias
Partida do motor	Até 1 MW, tempo de resposta (milissegundos – segundos), tempo de descarga (segundos a minutos)	Baterias e supercapacitores
Fontes de alimentação ininterrupta	Até 5 MW, tempo de resposta (normalmente até segundos), duração de descarga (10 min a 2h)	Volantes de inercia, baterias e supercapacitores
<i>Transmission upgrade deferral</i>	~10 – 100 + MW, tempo de resposta (minutos), tempo de armazenamento na capacidade nominal (1- 6h)	PHS e baterias
Reserva permanente	1 – 100 MW, tempo de resposta (<10min), tempo de armazenamento em capacidade nominal (1 – 5h)	Baterias

Fonte: Adaptado de (LUO *et al.*, 2015).

Para facilitar o entendimento, abaixo será explicado de forma breve as aplicações presentes (LUO *et al.*, 2015).

- Integração de suavização de renováveis intermitentes: Com a utilização do armazenamento de energia as fontes renováveis intermitentes podem ser apoiadas, estabilizadas ou suavizadas.
- Energia de backup de emergência e telecomunicações: Nessa aplicação é utilizado o armazenamento de energia para casos em que possa ocorrer falhas de energia, de modo que o armazenamento seja usado como fonte de alimentação de emergência,

fornecendo energia adequada para usuários importantes, como sistemas de telecomunicações até que a fonte principal seja normalizada.

- *Ramping and load following*: Será utilizado o armazenamento de energia no intuito de fornecer suporte para alterações de carga à demanda de eletricidade.
- *Time shifting*: A estratégia dessa utilização se baseia no princípio de armazenar energia em períodos em que a energia elétrica tem menor custo e a utilizar em períodos de pico de demanda.
- *Peak shaving* e nivelamento de carga: O *Peak shaving* tem como função utilizar a energia armazenada em períodos fora do pico para compensar a geração de energia em momentos de demanda máxima de energia, tirando a necessidade de usar a geração de energia em momentos de pico em que a eletricidade está mais cara. Já o nivelamento de carga tem como intuito equilibrar as grandes flutuações associadas à demanda de eletricidade.
- Armazenamento de energia sazonal: Se refere à energia armazenada durante dias, semanas ou meses, responsável por compensar eventuais faltas causadas por falta de fornecimento ou variações sazonais de oferta e demanda de energia. Nos sistemas hidráulicos ou hidrotérmico tem-se o principal exemplo nos reservatórios, sistemas com grande capacidade energética e quase nenhuma taxa de auto-descarga, utilizados para armazenar água em períodos mais chuvosos e utilizar esse armazenamento para transformar em energia em momentos do ano em que se tenha períodos mais secos.
- Estabilização de transmissão e distribuição: Utilizar o armazenamento de energia como suporte para operações síncronas de componentes em uma linha de transmissão ou em uma unidade de distribuição de regulação da qualidade de energia, garantindo que o sistema funcione em condições normais de trabalho.
- *Black-start*: O armazenamento de energia pode fornecer a capacidade de iniciação de um sistema a partir de uma condição de desligamento sem tirar a energia da rede, ou seja, é um processo de restauração da eletricidade sem depender da rede externa de transmissão de energia para se recuperar de um desligamento parcial ou total.
- Suspensão de flutuação de rede: Tem como estratégia utilizar o armazenamento de energia para fornecer a função de proteção para sistemas eletrônicos sensíveis a flutuações de energia.
- Reserva girante: No caso de um rápido aumento de geração, que pode ser causado por uma diminuição da carga, o sistema de armazenamento de energia teria a função

de responder imediatamente a essa variação e ter a capacidade de manter a saída por até algumas horas.

- Aplicação em transportes: Fornece energia para transportes, como os veículos híbridos e elétricos. Possuir alta densidade de energia, pequenas dimensões, pouco peso e rápida resposta são elementos necessários para essa aplicação.
- Fonte de alimentação ininterrupta: Tem como objetivo proporcionar o mantimento ininterrupto de energia com a utilização de um sistema de armazenamento de energia.
- Reserva permanente: Tem como propósito equilibrar a oferta e a demanda de eletricidade, sendo usada para lidar com a demanda real maior que a demanda prevista.

As tecnologias de armazenamento de energia podem ser utilizadas em quase todo o alcance da operação do sistema elétrico, por possuírem características diversificadas de potência e energia. Dessa maneira, o sistema de armazenamento auxilia na melhoria do comportamento do sistema elétrico, permitindo respostas rápidas a perturbações que possam provocar significativas variações de tensão, frequência ou no fluxo de potência no sistema. Assim, contribui na regulação de frequência, controle de tensão e na estabilidade do sistema. Além disso, esses sistemas podem ser utilizados em aplicações que demandam operações a maior prazo com elevada capacidade de energia e elevado tempo de descarga, como é o caso da utilização na gestão de energia para o nivelamento de carga e a gestão de pontas, transferindo energia de períodos com menor necessidade e a utilizando em períodos de maior necessidade, reduzindo seu custo. Assim, a partir da descrição das principais características de cada bateria, se faz necessário projetar modelos capazes de capturar os atributos de operação intrínsecos em cada uma delas. Por esse motivo, se torna essencial o estudo de modelos matemáticos capazes de simular o armazenamento de energia, auxiliando em aplicações como: correção do fator de potência, ajuste de frequência, regularização de fontes intermitentes e alívio de picos nas curvas de carga. Com isso, esse trabalho irá focar no armazenamento de energia a partir de baterias de chumbo-ácido, por apresentar um consolidado tempo de mercado e utilização em diversas aplicações comuns no cotidiano. Na próxima seção serão tratados os principais modelos matemáticos para esse tipo de armazenamento seguido da simulação do modelo baseado em um dos métodos descritos.

3 MODELOS MATEMÁTICOS DAS BATERIAS

Atualmente, existem diversos estudos que descrevem o comportamento das baterias, permitindo a criação de modelos matemáticos capazes de representar a sua dinâmica de funcionamento nas mais variadas situações. Quatro critérios básicos devem ser analisados na escolha de um modelo matemático (RAVISHANKAR; VRUDHULA; RAKHMATOV, 2003):

- Exatidão: representando a proximidade dos valores previstos nas variáveis de interesse com os obtidos experimentalmente.
- Complexidade computacional: o tempo e esforço necessário para o processamento da simulação.
- Configuração: a quantidade de parâmetros que o modelo é capaz de estimar juntamente com os conhecimentos necessários para obtê-los.
- Visão analítica: compreensão qualitativa do comportamento da bateria a partir das equações do modelo.

3.1 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DAS BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Para o desenvolvimento de um modelo matemático que possa descrever o comportamento de uma bateria de chumbo-ácido, é necessário a compreensão de conceitos básicos, que incluem a capacidade de carga e descarga, tensão de circuito aberto (*Open-Circuit Voltage- OCV*), estado de carga (*State of Charge- SOC*), profundidade de carga (*Depth of Charge- DOC*), estado de saúde (*State of Health- SOH*), resistência interna e autodescarga desse tipo de bateria. A seguir, esses conceitos são descritos, bem como apresentadas formas de cálculos dos seus parâmetros.

3.1.1 Capacidade

Essa propriedade se refere a carga elétrica que a bateria consegue fornecer em determinadas condições, normalmente medido em ampère-hora (Ah) e depende dos seguintes fatores (OGAWA, 2011; ROBERT BOSCH, 2007):

- Quantidade de material ativo usado na bateria (pasta de chumbo usado nas placas);
- Densidade, temperatura e nível de estratificação do eletrólito;

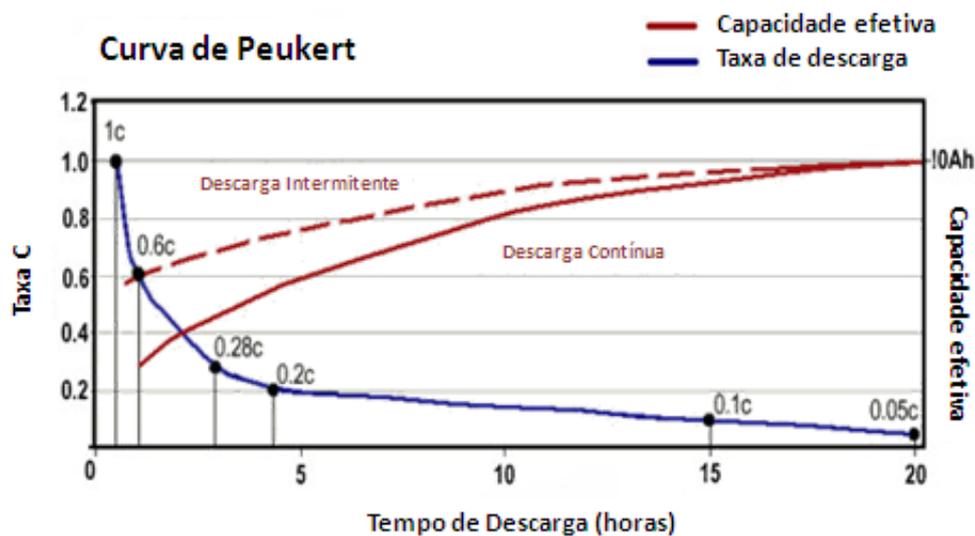
- Nível de corrente de descarga e processo de descarga em função do tempo;
- Idade da bateria;

Não sendo uma grandeza fixa, a capacidade de uma bateria varia de acordo com a velocidade com que é descarregada, sendo expressa pela lei de Peukert, conforme a equação 4 (GUO, 2010).

$$C_p = I^k t \quad (4)$$

Em que C_p é a capacidade de descarga de um ampère, I é a corrente de descarga (A), t é o tempo de descarga (h) e k é a constante adimensional de Peukert. A constante de Peukert reflete a resistência interna da bateria, variando exponencialmente como mostrado na Figura 10. Para baterias de chumbo-ácido, esse número se encontra entre 1,1 e 1,3, aumentando de acordo com a idade da bateria (OGAWA, 2011; GUO, 2010).

Figura 10 — Curva de Peukert



Fonte: (RODRÍGUEZ, 2012)

A capacidade pode ser medida utilizando o padrão C-raste, sendo C_n referido à capacidade da bateria em Ah, que corresponde a sua descarga completa em “n” horas. Os mais comuns são o C20 e C5, que correspondem, respectivamente, a capacidade da bateria de 12V de fornecer corrente durante 20 horas e 5 horas em temperatura ambiente sem que a tensão entre seus polos seja inferior a 10,5 V.

3.1.2 Tensão de circuito aberto (VOC)

É o valor medido de tensão quando os terminais da bateria estão conectados em um circuito aberto, ou seja, é obtida quando a bateria não está alimentando uma carga. Sendo função da temperatura e da concentração do eletrólito, para se obter o seu valor corretamente é necessário repousar a bateria para que o VOC atinja um valor estável ou executar um procedimento de descarga rápida para eliminar o valor de tensão superficial que pode ter sido gerada pelo processo de carga e descarga devido as perdas resistivas e da polarização das placas (OGAWA, 2011; LINDEN; REDDY, 2002; ROBERT BOSCH, 2007).

3.1.3 Tensão de corte

A tensão de corte é definida como a menor tensão que um sistema de baterias pode atingir em operação, definida pelo fabricante com uma taxa de descarga definida.

3.1.4 Taxa de carga e descarga

A taxa de carga e descarga é definida como a razão entre a capacidade nominal da bateria para o período de carga e descarga em horas. Se uma bateria que possui uma capacidade de 100 Ah nominal é descarregada a 5 A, a taxa de descarga é $C/20$.

3.1.5 Força eletromotriz

É definida como a energia potencial por unidade de carga elétrica produzida pela bateria para o circuito elétrico que ela alimenta, podendo ser compreendida como a quantidade de trabalho que a bateria realiza para mover as cargas elétricas entre dois pontos do circuito.

3.1.6 Estado de carga (SOC) e profundidade de carga (DOC)

O estado de carga (SOC) e a profundidade de carga (DOC) são variáveis responsáveis por descrever o comportamento da carga na bateria. O estado de carga indica uma medida da quantidade de carga restante na bateria durante um ciclo e pode ser medido por meio da

estimativa de tensão em circuito aberto, contagem de *Coulomb* ou contagem Ampere-hora, medição das propriedades físicas do eletrólito, espectroscopia de Eletro-Impedância, redes neurais artificiais e estimativa de estado usando filtros probabilísticos (OLIVEIRA, 2013). Seu cálculo pode ser feito utilizando o método de “contagem de Coulomb”, demonstrado na Equação 5 que será detalhada posteriormente (XIAO; SHI; HE, 2010).

$$SOC = SOC_{(0)} - \frac{1}{C_p} \int_0^t I(t) dt \quad (5)$$

Já a profundidade de carga, demonstrada na Equação 6, representa o percentual de energia acumulada que a bateria possui para um dado valor de corrente de descarga. A principal diferença entre os dois é que o estado de carga descreve a porcentagem restante de carga em relação a capacidade nominal, enquanto a profundidade de carga indica essa relação referente a uma corrente de descarga específica.

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C_I} \quad (6)$$

Em que, Q_e é a carga consumida nas baterias (Ah), C_p é a capacidade nominal (Ah) e C_I é a capacidade real com a corrente de descarga I (Ah).

3.1.7 Vida útil da bateria

É definido como o tempo útil em que a bateria realiza trabalho no sistema até precisar ser substituída, sendo sua vida útil afetada por diversos fatores, desde suas condições de trabalho até a seleção dos materiais de construção e processos de fabricação. De modo geral, a vida útil da bateria é citada pelo número de ciclos de carga e descarga que ela é capaz de desempenhar.

3.1.8 Resistência interna

Expressa a resistência ôhmica da bateria, determinando a quantidade de energia que pode ser entregue em um determinado espaço de tempo. Existem múltiplos fatores que devem

ser considerados para obter essa medida, como a temperatura, projeto das grades da bateria, porosidade de suas placas empastadas, espessura, tipo de separador e método de conexão entre as células (OGAWA, 2011; LINDEN; REDDY, 2002). Entretanto, adotando aproximações e simplificações matemáticas, esse parâmetro pode ser determinado pela Equação 7, a seguir.

$$r = \frac{V_{oc} - V_t}{I} \quad (7)$$

Em que, V_{oc} é a tensão de circuito aberto (V), V_t é a tensão terminal de descarga (V) e I é a corrente de descarga (Ah).

3.1.9 Estado de saúde

O estado de saúde é uma variável que compara percentualmente a condição da bateria em relação a sua condição nominal. Esse valor é de 100% quando a bateria está nova e diminui com o decorrer do uso, principalmente com a corrosão e sulfatação das grades, que faz existir uma diminuição da capacidade de armazenamento. Como consequência disso, existe a perda de massa ativa das placas da bateria a cada ciclo de carga e descarga. Essa variável representa a porcentagem restante de capacidade atual da bateria em relação a sua capacidade inicial e pode ser calculada pela Equação 8.

$$SOH = \frac{C_{fraca}}{C_{nova}} \quad (8)$$

Em que, C_{fraca} representa a capacidade restante de uma bateria já utilizada (Ah) e C_{nova} representa a capacidade da bateria em estado de nova (Ah).

As razões para a perda de capacidade envolvem grande complexidade, mas normalmente estão associadas a sulfatação, que é o processo em que o sulfato de chumbo amorfo, que é facilmente convertido de volta em chumbo, óxido de chumbo e ácido sulfúrico, se converte em uma forma cristalina que reveste os eletrodos, de modo a não conduzir eletricidade e não podendo ser convertido novamente em chumbo, dióxido de chumbo e sulfato de chumbo em condições normais de carregamento. A utilização excessiva do material ativo devido a descargas completas e profundas das baterias com uma densidade baixa de corrente são os motivos mais críticos para a perda de capacidade (GUO, 2010).

3.1.10 Autodescarga

A autodescarga é um processo decorrente das constantes reações químicas internas da bateria, mesmo que nenhum receptor esteja ligado a ela, levando a perdas de energia com o passar do tempo. É provocada por impurezas metálicas presentes na bateria, como, por exemplo, o antimônio usado como liga para endurecer as grades de chumbo.

Nas baterias mais modernas a quantidade de antimônio é consideravelmente menor, sendo substituído por outros elementos que causam uma autodescarga menor, como o cálcio. Essa substituição específica representa uma taxa de descarga inferior a 0,1% da capacidade da bateria por dia.

Além da quantidade de antimônio presente na bateria, essa taxa de autodescarga depende principalmente dos seguintes fatores: temperatura, idade da bateria e umidade. Em relação à temperatura, quando mais alta for, mais acelerados serão os processos químicos na bateria, resultando em uma maior taxa de autodescarga. De forma semelhante ocorre em relação à idade e à umidade: quanto mais velha e mais úmida se encontrar a bateria, a sua taxa de autodescarga aumenta.

3.2 PRINCIPAIS MODELOS MATEMÁTICOS

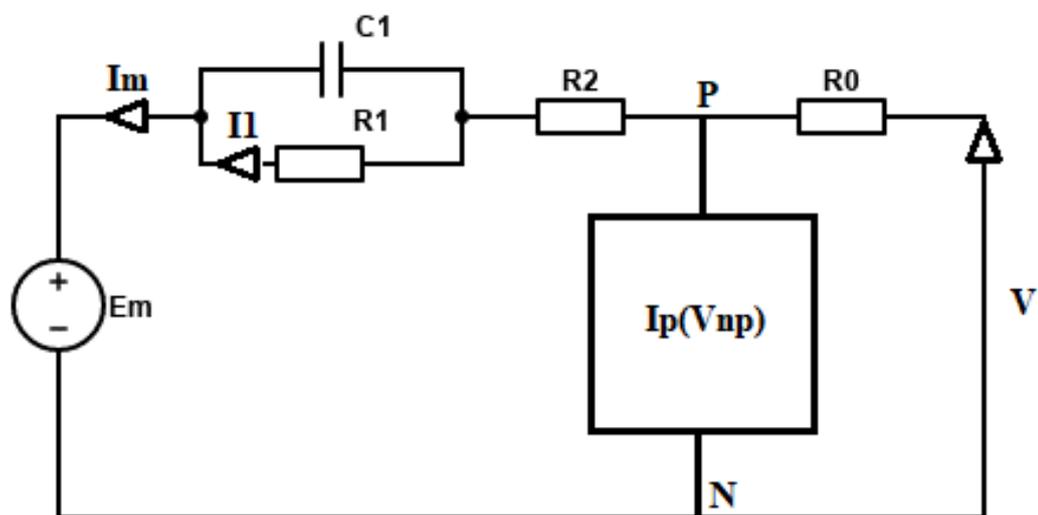
Para entender o funcionamento das baterias, é necessário compreender maneiras de modelar seus principais comportamentos. Sendo assim, serão apresentados nesse item alguns modelos matemáticos para simulações utilizando baterias, facilitando o entendimento do leitor a respeito do tema.

3.2.1 Modelo Ceraolo

Esse modelo foi desenvolvido com os principais resultados de estudos realizados por mais de uma década na Universidade de Pisa em cooperação com outras instituições italianas, buscando desenvolver um modelo elétrico de bateria de chumbo-ácido complexo e preciso mais prático para o uso diário, possibilitando o estudo em diferentes cenários sem a necessidade de experimentos de laboratório para obtenção de dados muitas vezes não disponíveis na bateria (CERAOLO, 2000). Diferente dos modelos de bateria existentes, que buscam modelar os

componentes físicos da bateria por meio de elementos elétricos, esse novo método busca analisar o comportamento da bateria visto dos seus terminais, como apresentado na Figura 11.

Figura 11 — Modelo de bateria Ceraolo



Fonte: Adaptado de (CERAOLO, 2000).

O autor modelou o sistema usando um equivalente elétrico R-C e um bloco parasita, algoritmos para calcular o estado de carga e temperatura interna, além de equações para o cálculo dos elementos do equivalente elétrico em função do estado de carga e de temperatura.

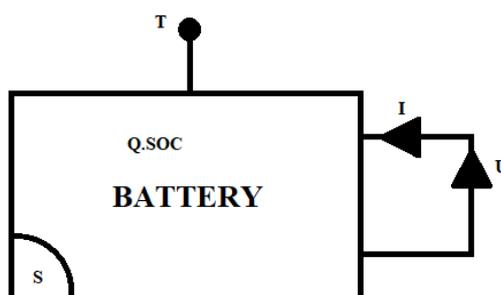
Com isso, foi possível modelar o comportamento complexo e não linear das baterias eletroquímicas usando circuitos equivalentes, mesmo contendo na sua construção elementos não lineares, que dependem do estado de carga e da temperatura do eletrólito. Essa abordagem simplifica o entendimento do seu comportamento, pois serão utilizados elementos elétricos e não mais reações químicas na sua modelagem. Essa nova maneira de descrever o comportamento da bateria pode ser aplicada para diversas finalidades, como a simulação computacional em diferentes condições de operação e na gestão de sistemas que contém baterias eletroquímicas, verificando estado de carga, monitoramento e diagnóstico de problemas (CERAOLO, 2000).

3.2.2 Modelo de Duval

Esse projeto teve como objetivo desenvolver um modelo que descrevesse o comportamento de uma bateria de chumbo-ácido para ser utilizado em um software de arquitetura elétrica de veículos. Esse modelo desenvolvido por Duval (1995) é do tipo caixa

preta e descreve como varia seu estado de carga (SOC), tensão nos terminais da bateria e comportamento da sua capacidade, dependendo de fatores como a corrente de descarga, temperatura no eletrólito, energia entregue a carga, tensão nos terminais da bateria e seu estado de carga. A principal desvantagem do modelo apresentado por Duval (1995) é a identificação dos parâmetros da bateria, que envolve um longo protocolo experimental de carga e descarga da bateria. Esse modelo é apresentado na Figura 12.

Figura 12 — Modelo da bateria de Duval



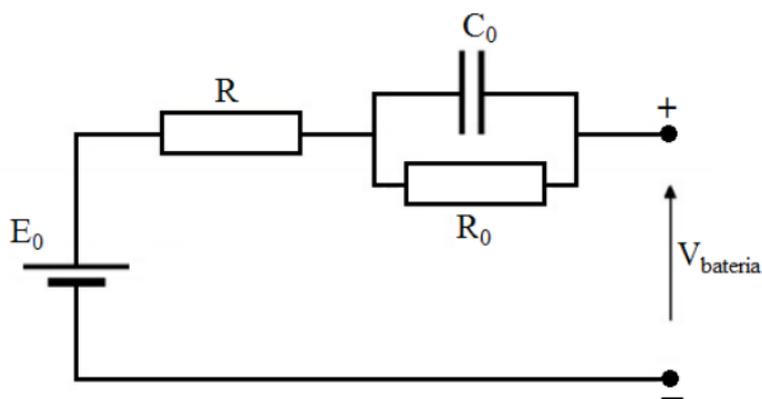
Fonte: Adaptado de Duval (1995)

3.2.3 Modelo de Casacca, Salameh e Lynch

Esse modelo tem como objetivo viabilizar uma descrição detalhada dos processos físicos que ocorrem na bateria, o que lhe confere utilidade na área de projeto como ferramenta para auxiliar no aperfeiçoamento dos parâmetros de uma bateria. Seu objetivo é representar uma bateria por meio de um circuito elétrico equivalente, composto por fontes de tensão, fontes de corrente, resistências e capacitores, sendo ideal para integração na simulação com outros circuitos elétricos e sistemas (SALAMEH; CASACCA; LYNCH, 1992). Existem diversos modelos elétricos capazes de representar baterias, sendo composto em maioria por três categorias básicas: circuito equivalente de *Thévenin*, modelos baseados em impedância, e modelos baseados em tempo de execução (CHEN; MORA, 2006; JOSÉ FILHO, 2017).

O circuito equivalente de *Thévenin* é utilizado para descrever uma bateria considerando seus componentes constantes, desprezando a sua variação com o estado de carga e taxa de descarga. O circuito é representado por uma tensão ideal (E_0), uma resistência interna (R), uma capacitância (C_0) expressando a capacitância efetiva, e uma resistência de sobretensão (R_0) com o intuito de apresentar a resistência devido ao contato entre as placas e eletrólito. A Figura 13 demonstra o circuito equivalente de *Thévenin* de acordo com (SALAMEH; CASACCA; LYNCH, 1992).

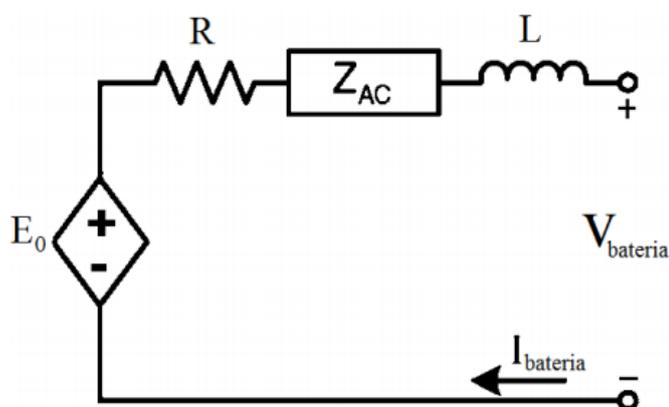
Figura 13 — Circuito equivalente de Thevenin.



Fonte: Adaptado de (SALAMEH; CASACCA; LYNCH, 1992)

Já para os modelos baseado em impedância, é utilizada a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica a fim de obter um modelo representativo de impedância CA-equivalente no domínio da frequência, possibilitando utilizar uma rede equivalente com impedância Z_{AC} para ser ajustado o espectro de impedância de acordo com o proposto no modelo de Casacca e Salameh (JOSÉ FILHO, 2017). A Figura 14 exemplifica um modelo baseado em impedância com seus respectivos componentes.

Figura 14 — Modelo baseado em impedância

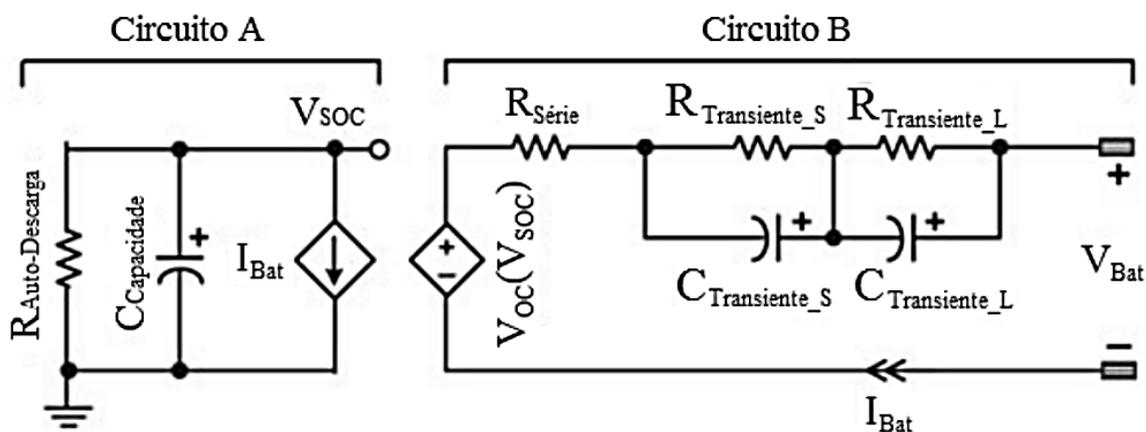


Fonte: Adaptado de (CHEN; MORA, 2006)

Por outro lado, os modelos baseados em tempo de execução utilizam uma rede complexa de circuitos para simular o comportamento da bateria, mas não permitem prever, precisamente, o seu comportamento em tempo real e a tensão de resposta em corrente contínua para diferentes correntes de carga. Para ser implementado, as simulações podem ser feitas tanto em tempo contínuo, utilizando simuladores SPICE, ou em tempo discreto, por meio do uso de códigos

VHDL (CHEN; MORA, 2006). A Figura 15 expressa um exemplo de modelo baseado em tempo de execução proposto por Kim e Qiao (KIM; QIAO, 2011).

Figura 15 — Modelo baseado em tempo de execução



Fonte: Adaptado de (KIM; QIAO, 2011)

O circuito A é utilizado para representar o monitoramento do estado de carga (SOC) e prever o tempo de operação da bateria, em que a resistência de autodescarga ($R_{\text{auto-descarga}}$) é usada para caracterizar a energia perdida durante seu processo natural de auto descarregar, a capacitância ($C_{\text{Capacidade}}$) é usada para representar a carga armazenada na bateria e a fonte de corrente (I_{Bat}) representa a corrente de carga e descarga da bateria (KIM; QIAO, 2011; JOSÉ FILHO, 2017).

O circuito B simula a tensão e corrente de resposta transiente da bateria, em que a fonte de tensão controlada V_{oc} (V_{soc}) tem como objetivo interligar a tensão de circuito aberto V_{oc} com o estado de carga V_{soc} da bateria. As resistências e capacitância são utilizadas para descrever a resposta de curta e de longa duração dos transitórios da bateria, já a resistência série $R_{Série}$ é usada para simular as perdas de energia durante a carga/descarga e a tensão V_{Bat} apresenta a tensão nos terminais da bateria.

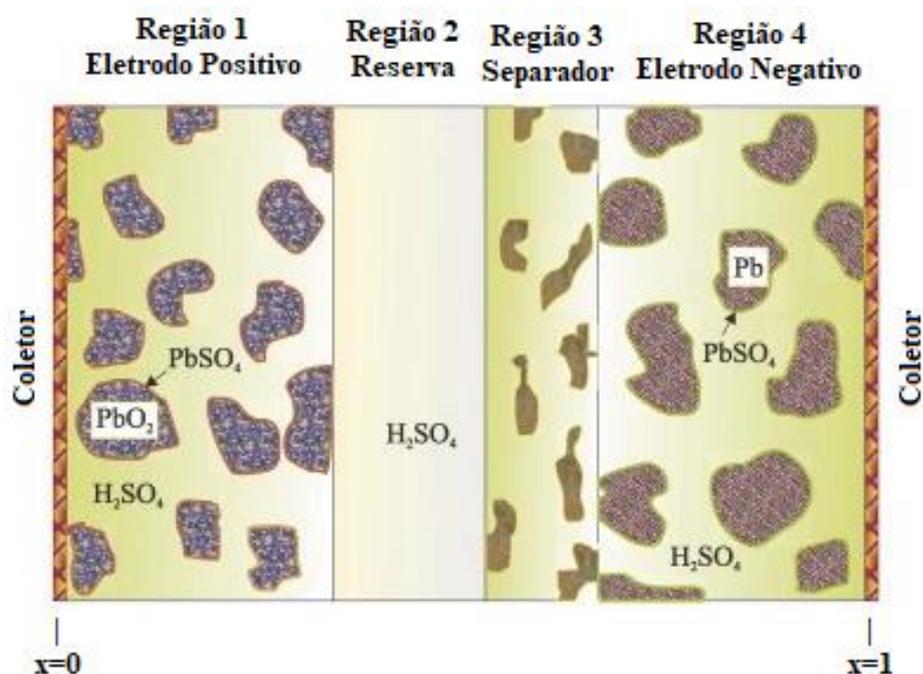
3.2.4 Modelo de Esfahanian, Torabi e Mosahebi

O estudo desenvolvido em (ESFAHANIAN; TORABI; MOSAHEBI, 2008) tem como objetivo introduzir um modelo matemático aprimorado e eficiente, cuja velocidade de execução o permita ser utilizado em simulações em tempo real. O modelo se baseia na dinâmica computacional dos fluidos (*Computational Fluid Dynamics- CFD*) e no modelo de circuito

equivalente (*Equivalent circuit model- EMC*), os quais são responsáveis pela modelagem de cada fenômeno da bateria por meio do uso de componentes elétricos, tornando a simulação rápida e precisa. Além disso, são realizadas resoluções de equações dinâmicas da bateria, empregando técnicas numéricas avançadas em função do tempo e espaço, relacionando as propriedades físicas, como a concentração de ácido e distribuição de potencial na célula.

Na Figura 16 é apresentada uma célula típica de chumbo-ácido utilizada no modelo, dividida em quatro regiões: um coletor de chumbo em $x = 0$, um eletrodo de PbO_2 positivo, um reservatório de eletrólito, um separador poroso, um eletrodo negativo de Pb, e um outro coletor de chumbo em $x = 1$.

Figura 16 — Célula de chumbo-ácido



Fonte: Esfahanian; Torabi; Mosahebi (2008)

O modelo proposto é aplicável apenas a baterias de chumbo-ácido tradicionais ventiladas. Desse modo, são descritas as equações gerais da dinâmica da bateria, desenvolvidas por Wang e Gu, incluindo suas reações químicas, eletrolíticas e eletroquímicas (ESFAHANIAN; TORABI; MOSAHEBI, 2008; WANG; GU; LIAW, 1998) resultando em um modelo que herdou a precisão do modelo CFD e a compreensão física do ECM.

3.2.5 Modelo de Shepherd-Schiffer

No estudo realizado por (SCHIFFER *et al.*, 2007) objetivou-se apresentar um modelo que possibilitasse determinar o tempo de vida útil das baterias de chumbo-ácido fazendo, a comparação dos impactos de diferentes condições operacionais, tamanhos de sistemas e diferentes tecnologias envolvidas na fabricação dessas baterias. Dessa maneira, serve de ferramenta para projetistas e operadores de sistemas dimensionarem a melhor opção de bateria, auxiliando na escolha da marca, tecnologia e tamanho da bateria, para a aplicação solicitada.

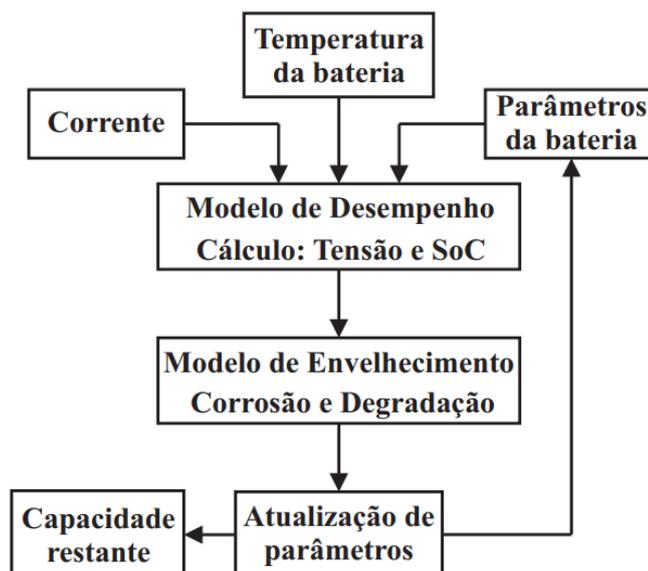
O modelo é baseado no conceito de taxa de transferência Ah ponderada, a qual para um ciclo completo regular atribui-se um fator de ponderação igual a 1. Já para condições operacionais severas, que são definidas por meio ciclo parcial de carga, ciclismo com estratificação de ácido significativa, altas temperaturas e tempo desde o último carregamento completo, atribui-se um fator de ponderação maior que 1 (SCHIFFER *et al.*, 2007).

Para representar o envelhecimento da bateria, o modelo considera como parâmetros dois mecanismos: a corrosão da grade do eletrodo positivo e a degradação do material ativo. Além disso, devido ao seu impacto direto no envelhecimento da bateria, o modelo ainda considera a estratificação ácida, os gases e a sulfatação.

Para simplificar o modelo, a Figura 17 apresenta um fluxograma das etapas de simulação. A tensão e o estado de carga são determinados com base nos parâmetros da bateria, sendo a tensão calculada de acordo com a equação de Shepherd modificada e o estado de carga integrando a diferença entre a corrente total da bateria e a corrente de gás. Estabelecidos os valores de tensão e o estado de carga, os parâmetros de corrosão e degradação serão determinados e usados para definir a capacidade restante da bateria, ou seja, a capacidade da bateria em seu estado de carga total para uma taxa de corrente de descarga definida, principal saída do modelo (SCHIFFER *et al.*, 2007; SOUSA; LIMA, 2008).

Outro ponto importante desse estudo se encontra no fato da temperatura influenciar no comportamento da bateria, que é determinada a partir das condições de temperatura ambiente, em que diferentes cenários podem ser escolhidos de modo que a temperatura da bateria seja igual a ambiente. Esse comportamento funciona para aplicações com correntes médias abaixo da taxa de descarga de 10 h, pois o aquecimento da bateria devido à corrente de operação pode ser desconsiderado.

Figura 17 — Diagrama de fluxo do modelo

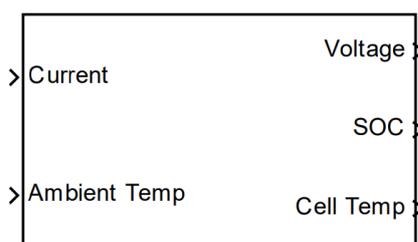


Fonte: (SOUSA; LIMA, 2008)

3.2.6 Modelo de Jackey

O estudo proposto em (JACKEY, 2007) foi desenvolvido utilizando o software Simulink e tinha como objetivo implementar um modelo rápido, simples e que conseguisse suprir as necessidades de simulações de sistema de armazenamento por baterias para o sistema elétrico de modo geral. Para isso, foi elaborado um modelo de um sistema de bateria de chumbo-ácido o qual foi concebido para aceitar entradas de corrente e temperatura ambiente, fornecendo na sua saída valores de tensão, estado de carga e temperatura do eletrólito, como apresentado na Figura 18.

Figura 18 — Modelo da bateria

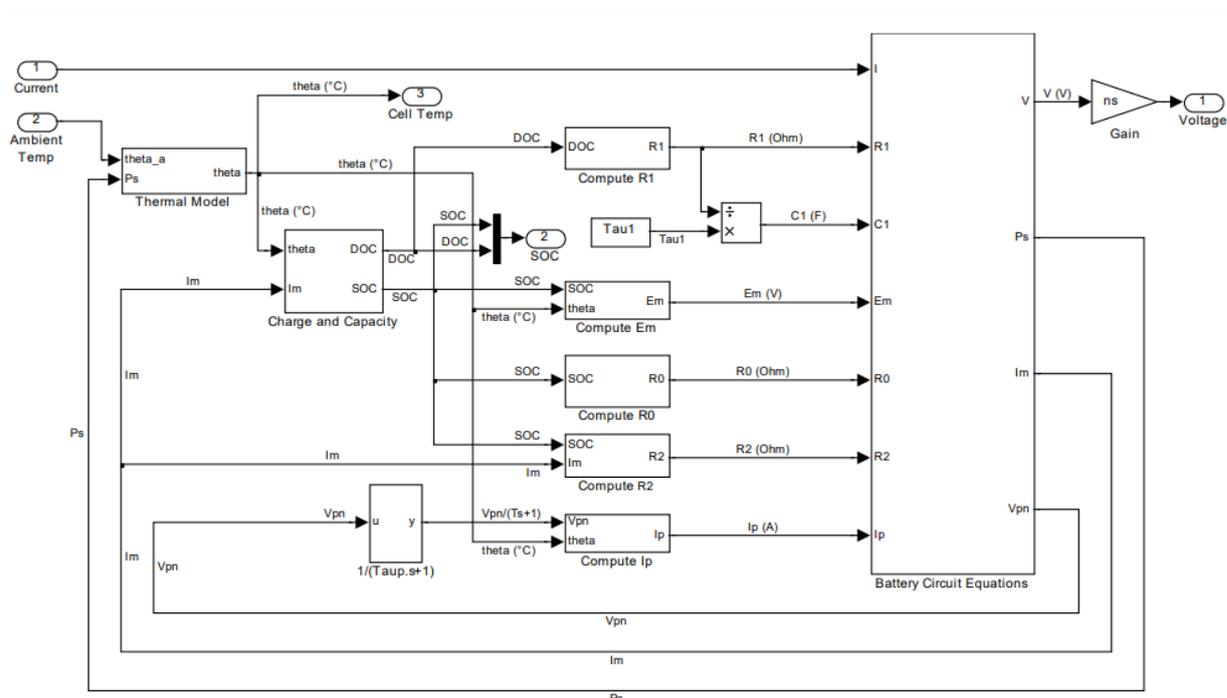


Fonte: (JACKEY, 2007)

Na Figura 19 é apresentado o diagrama da estrutura do modelo da bateria, para facilitar seu entendimento e simulação, esse modelo foi dividido em três partes: o modelo do circuito da

bateria, responsável por descrever o circuito equivalente em função de parâmetros não lineares e corrente; o modelo térmico, que é utilizado para monitorar a temperatura do eletrólito; e o modelo de carga e capacidade com o intuito de inspecionar o estado de carga e a profundidade de descarga da bateria.

Figura 19 — Diagrama da estrutura do modelo da bateria



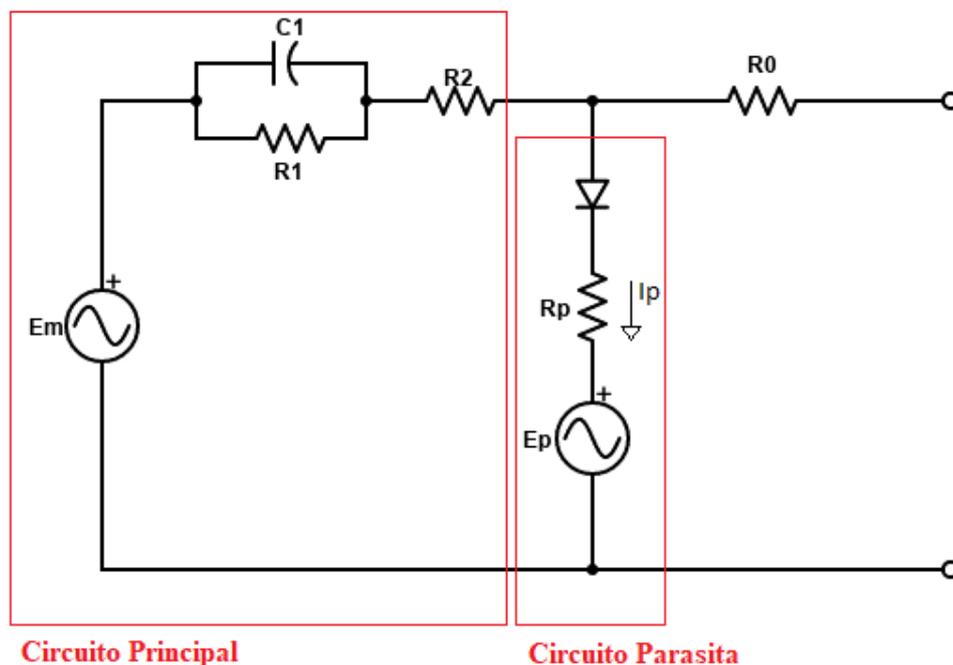
Fonte: (JACKEY, 2007)

A Figura 20 apresenta o circuito simplificado da Figura 19, em que a estrutura não modela diretamente a química interna da bateria, mas aproxima-se empiricamente do comportamento visto nos terminais da bateria, sendo composto por um circuito principal, simulando a dinâmica da bateria sob a maiorias das condições, e um circuito parasita responsável por descrever o comportamento da bateria no fim da carga (JACKEY, 2007).

O circuito equivalente da bateria representa apenas uma célula da bateria, dessa maneira, no diagrama apresentado na Figura 19 é adicionado um bloco de ganho, com valor do parâmetro “ns”, que foi multiplicado por seis, considerando que cada célula se comporta de maneira idêntica. Essa multiplicação representa o número de células série necessárias para modelar uma bateria de 12V, normalmente utilizada em automóveis.

Para encontrar os parâmetros do circuito são utilizados algoritmos de otimização e as curvas de carga e descarga experimentais, tendo como vantagem sua precisão, com erro de aproximadamente 3,2%.

Figura 20 — Circuito equivalente do modelo



Fonte: Adaptado de (JACKEY, 2007)

Sendo composto pelos componentes descritos abaixo:

- E_m : Força eletromotriz ou tensão de circuito aberto (OCV) que varia em função da temperatura e do estado de carga (SOC), sendo medida em Volts [V].
- C_1 : Capacitância do ramo principal, responsável por simular o atraso da tensão e varia em função da resistência do ramo principal, sendo medida em Farads [F].
- R_1 : Resistência do ramo principal que varia com a profundidade de carga (DOC) e exponencialmente com o estado de carga (SOC), sendo medida em Ohms [Ω].
- R_2 : Resistência do ramo principal que aumenta exponencialmente em função do aumento do estado de carga (SOC) e varia com a corrente que flui no circuito principal, sendo insignificante no processo de descarga da bateria. Sua medida é feita em Ohms [Ω].
- R_0 : Resistência vista pelos terminais da bateria e considerada constante para todas as temperaturas, variando com o estado de carga (SOC). Sua medida é feita em Ohms [Ω].
- I_p : Perda por corrente parasita quando a bateria está sendo carregada, depende da temperatura do eletrólito e da tensão do circuito parasita, sendo medido em Ampères [A].

A partir da análise feita nesse capítulo, foi escolhido o modelo Jackey para a simulação por ter uma estrutura simples, rápida e eficaz comparado com outros modelos semelhantes, além de utilizar dados experimentais para modelar o comportamento dos parâmetros da bateria. Para a simplificação dos cálculos e análise mais detalhada dos processos, para esse trabalho será considerado apenas a descarga de uma bateria com capacidade de 63Ah, para isso o circuito equivalente da Figura 20 será simplificado com a retirada do circuito parasita e a resistência R_2 , pois ambas não influenciam nesse processo.

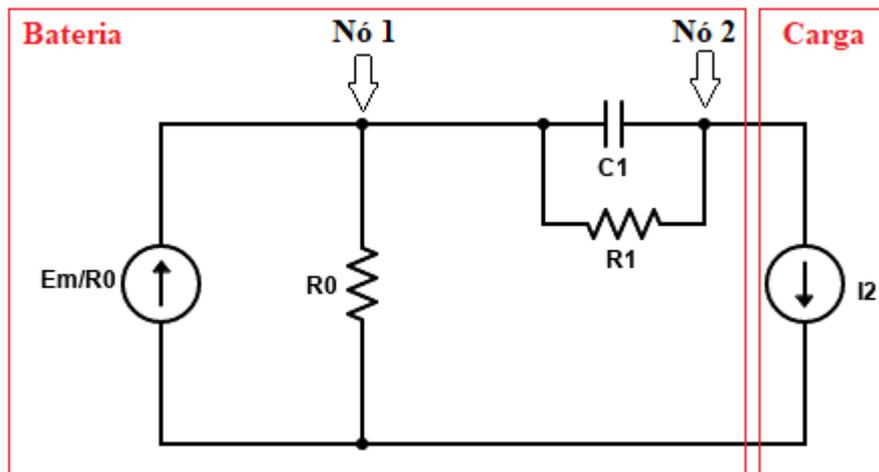
4 MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS – MODELO JACKEY NO AMBIENTE MATLAB®

Com a compreensão dos conceitos básicos das baterias de chumbo-ácido e a identificação dos principais modelos matemáticos apresentados no capítulo anterior, foi escolhido o modelo de Jackey para o aprofundamento do estudo do trabalho. Inicialmente será desenvolvida a análise do modelo utilizando a linguagem de código do software Matlab® versão 2020a, de modo a facilitar a verificação de sua fidelidade às respostas teóricas esperadas nessa análise.

4.1 CONSIDERAÇÕES NO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MODELO

Feitas as alterações no circuito do modelo com a retirada do ramo parasita e a resistência R_2 , o circuito equivalente da bateria de chumbo-ácido será representado utilizando fontes de corrente, simplificando a construção da equação que descreve seu comportamento. O circuito equivalente da modelagem da bateria é apresentado na Figura 21, em que a corrente de descarga i_2 é conhecida e está sendo consumida da bateria.

Figura 21 — Circuito equivalente simplificado da bateria de chumbo-ácido utilizando fonte de corrente



Fonte: Autoria própria

4.2 EQUAÇÃO DE MODELAGEM DA BATERIA

Com o circuito equivalente representado com fonte de corrente, será aplicada a 1ª Lei de Kirchhoff para obter os valores de tensão de cada nó em função dos parâmetros desconhecidos. Utilizando os nós 1 e 2, foram obtidas as equações 9 e 10.

Equação da tensão V1 no Nó 1:

$$\frac{Em}{R0} - \frac{V1}{R0} - \frac{(V1 - V2)}{R1} - C1 \frac{d}{dt}(V1 - V2) = 0 \quad (9)$$

Equação da tensão V2 no Nó 2:

$$\frac{(V1 - V2)}{R1} + C1 \frac{d}{dt}(V1 - V2) - i_2 = 0 \quad (10)$$

Passando as equações 9 e 10 para a forma matricial, reescrevendo em função da matriz massa $M(t,y)$ como $M_{(t,y)}y' = f_{(t,y)}$, é obtida a Equação 11, que representa a Equação de Modelagem da Bateria, sendo sua resolução o objetivo desse capítulo.

$$\begin{bmatrix} -C1 & C1 \\ C1 & -C1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} -Em \\ R0 \\ I2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R0} + \frac{1}{R1}\right) & -\frac{1}{R1} \\ -\frac{1}{R1} & \frac{1}{R1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para solucionar a Equação 11 será necessário obter os valores dos parâmetros [C1 Em R0 R1] desconhecidos, que resultam nos valores de tensão V1 no nó 1 e V2 no nó 2. Como para a análise será considerada uma corrente de descarga constante, os valores de [V1 V2] variam em função do tempo, representando o comportamento da bateria nesse processo. Em (CERAOLO, 2000) essas leis de formação dos parâmetros desconhecidos da bateria são evidenciadas, sendo elas apresentadas nas equações 12, 13, 14 e 15.

- Tensão no circuito principal: A Equação 12 se aproxima da força eletromotriz da bateria, ou a tensão de circuito aberto (OCV). Esse valor foi assumido como constante quando a bateria estiver totalmente carregada e variando com o estado de carga (SOC) e temperatura.

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \quad (12)$$

Em que:

E_{m0} é a tensão de circuito aberto (OCV) para um SOC de 100% dada em Volts [V];

K_E é uma constante dada em [V/°C];

θ é a temperatura do eletrólito dada em [°C];

SOC é o estado de carga da bateria dado em [%];

- Resistência dos terminais da bateria: A Equação 13 se aproxima da resistência de saída vista nos terminais da bateria. Essa resistência foi dita constante para todas as temperaturas, variando apenas com o estado de carga (SOC).

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (13)$$

Em que:

R_{00} é a resistência vista pelos terminais da bateria para um SOC de 100% dada em ohms [Ω];

A_0 é uma constante;

- Capacitância do ramo principal: A Equação 14 se aproxima de uma capacitância, representando um atraso no tempo. A constante de tempo modela um atraso de tensão quando há uma variação na corrente da bateria.

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (14)$$

Em que:

τ_1 é uma constante de tempo do circuito principal dada em segundos [s];

- Resistência do ramo principal: A equação 15 se aproximou de uma resistência no ramo principal da bateria.

$$R_1 = R_{10}e^{(1-k.SOC)} \quad (15)$$

Em que:

R_{10} é a resistência do circuito principal dada em ohms [Ω];

k é uma constante;

A partir das equações 12, 13, 14 e 15 os parâmetros desconhecidos [$C1$ Em $R0$ $R1$] são subdivididos em [E_{m0} K_E $SOC_{t>0}$] para a Equação 12, [R_{00} A_0] para a Equação 13, [τ_1] para a Equação 14 e [R_{10} k $SOC_{t=0}$] para Equação 15. Esses novos parâmetros serão divididos em dois grupos, um composto por parâmetros com leis de formação conhecidas e outro não.

- Grupo A: Formado por [E_{m0} K_E $SOC_{t>0}$ R_{00}] que são parâmetros que podem ser estimados sem a necessidade de processos de otimização.
- Grupo B: Esse grupo é formado por [A_0 R_{10} τ_1 $SOC_{t=0}$ k], que são parâmetros com leis de formação desconhecidas, necessitando de processos iterativos de otimização numérica para serem estimados. Os resultados da Equação 11 ficarão em função desses parâmetros desconhecidos.

Reescrevendo a Equação 11 em função dos parâmetros apresentados no grupo B, é obtida a Equação 16, que descreve o comportamento da bateria.

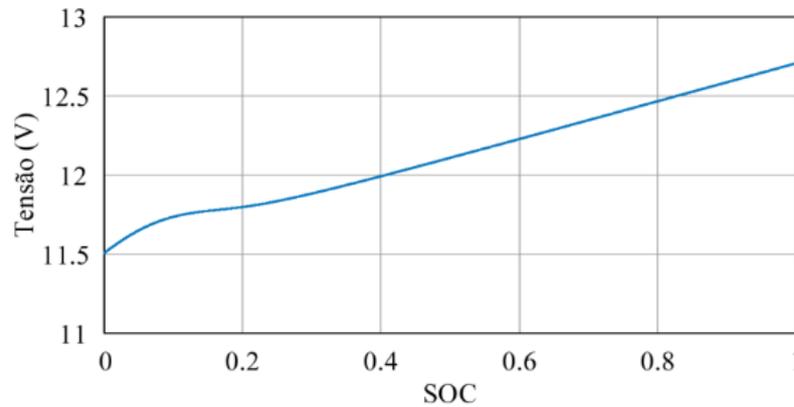
$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} -\frac{\tau_1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} & \frac{\tau_1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} \\ \frac{\tau_1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} & -\frac{\tau_1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V1]' \\ [V2] \end{bmatrix} \\
 = & \begin{bmatrix} \frac{-E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC)}{R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)]} \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)]} + \frac{1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} \right) & \frac{-1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} \\ \frac{-1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} & \frac{1}{R_{10}e^{(1-k.SOC)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V1] \\ [V2] \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

4.2.1 Cálculo dos parâmetros E_{m0} e K_E

A Figura 22 apresenta a curva da tensão de circuito aberto (OCV) em função do estado de carga (SOC) de uma bateria com capacidade de 63Ah, comumente fornecida pelo fabricante, cujo valor real é considerado nos cálculos dos parâmetros é 68,6Ah. No gráfico, é notório observar que o estado de carga varia de forma aproximadamente linear com a tensão, sendo possível associar essas grandezas conforme apresentado na Equação 17, em que a tensão para um SOC em 0% é 11,5 V e para um SOC em 100% é 12,7 V.

$$Y(x) = Ax + b \quad (17)$$

Figura 22 — Estado de carga em função da tensão de circuito aberto.



Fonte: Autoria própria

Escrevendo esses resultados no formato da Equação 17, é obtido:

$$\text{Tensão OCV} = E_m = 1,2V \cdot \text{SOC} + 11,5V$$

$$\text{SOC} = \frac{E_m - 11,5V}{1,2V} \quad (18)$$

Manipulando matematicamente a Equação 18 se chega à Equação 19, na qual é possível obter os valores de E_m e K_E .

$$\begin{aligned} \text{SOC} = \frac{E_m - 11,5V}{1,2V} &\rightarrow 1 - \frac{E_m - 11,5V}{1,2V} = (1 - \text{SOC}) \\ E_m &= 12,7 - 1,2(1 - \text{SOC}) \end{aligned} \quad (19)$$

Comparando a Equação 12 com a Equação 19 encontra-se os valores de E_m e K_E . Para isso será considerado uma temperatura ambiente de $\theta = 25^\circ\text{C}$.

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - \text{SOC}) \quad (12)$$

$$E_m = 12,7 - 1,2(1 - \text{SOC}) \quad (19)$$

Logo,

$$E_{m0} = 12,7V$$

$$K_E(273 + \theta) = 1,2 \rightarrow K_E = \frac{1,2}{(273+25)} \rightarrow K_E = 0,004027$$

4.2.2 Cálculo do parâmetro SOC

O parâmetro SOC varia ao longo do tempo e em função da corrente de descarga i_2 , podendo ser calculado por meio da Equação 5, apresentada no início desse capítulo. O SOC é bastante relevante nesse trabalho, sendo utilizado no cálculo de E_m , R_0 e R_1 .

$$SOC = SOC_{(0)} - \frac{1}{C_p} \int_0^t I(t) dt \quad (5)$$

Em que:

I é a corrente de descarga, dada em Ampères [A];

C_p é a capacidade da bateria;

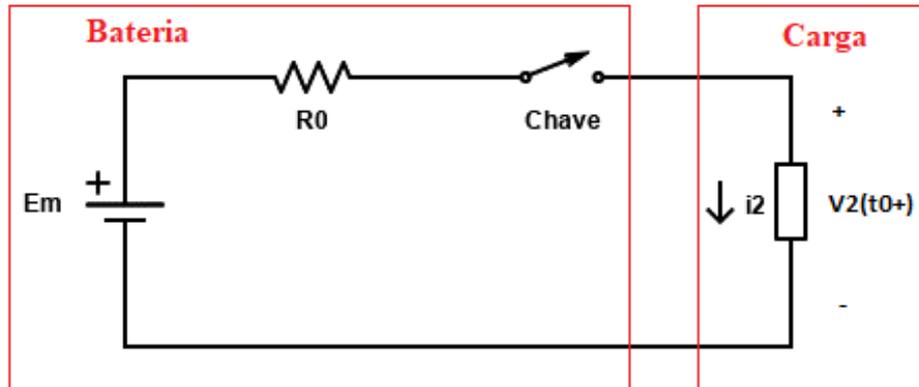
Δt é a variação do tempo, dado em horas [h];

$SOC_{t=0}$ é o estado inicial de carga, parâmetro desconhecido que será estimado utilizando métodos de otimização;

4.2.3 Cálculo do parâmetro R_{00}

Para equacionar esse parâmetro será necessário analisar o circuito simplificado da bateria no seu instante inicial, para isso, a Figura 20 com suas devidas considerações para simplificação do problema será apresentada como mostrado na Figura 23. No instante inicial, quando a chave é fechada em t_{0+} o capacitor se comporta como um curto-circuito, sendo retirado da representação. Consequentemente, R_1 também será excluído do modelo, já que não haverá corrente passando por ele decorrente do curto-circuito no capacitor. Nesse instante, os valores de V_2 , E_m e i_2 são conhecidos.

Figura 23 — Modelo simplificado da bateria de chumbo-ácido no instante inicial



Fonte: Autoria própria

Aplicando a Lei de Kirchhoff para a resolução do circuito é obtida a equação 20, que será isolado o parâmetro $R_0(t_{0+})$ para chegar na Equação 21.

$$-E_m(t_{0+}) + R_0(t_{0+}) \cdot i_2 + V_2(t_{0+}) = 0 \quad (20)$$

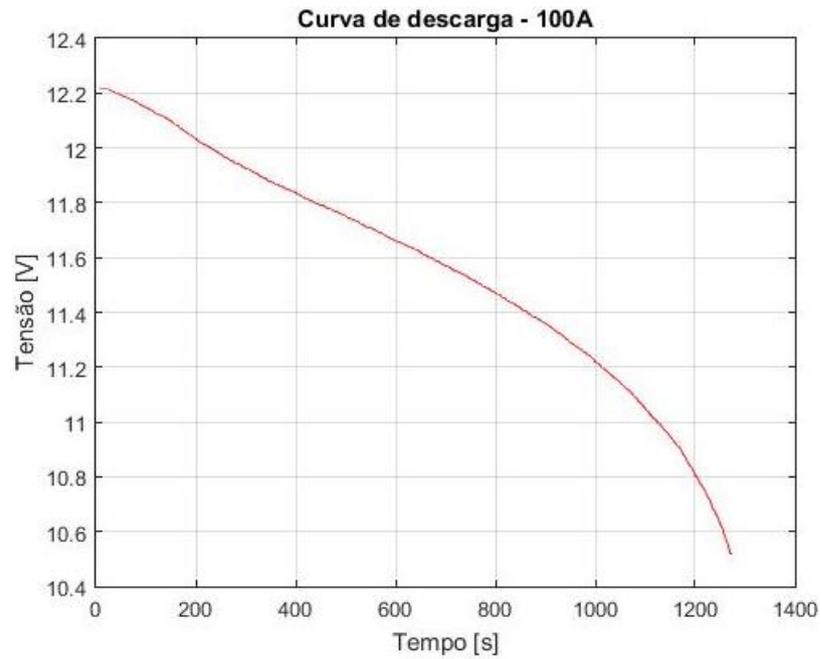
$$R_0(t_{0+}) = \frac{E_m(t_{0+}) - V_2(t_{0+})}{i_2} \quad (21)$$

Utilizando a Equação 13 para substituir o valor de $R_0(t_{0+})$ nela, temos a Equação 22, que calcula o valor de R_{00} .

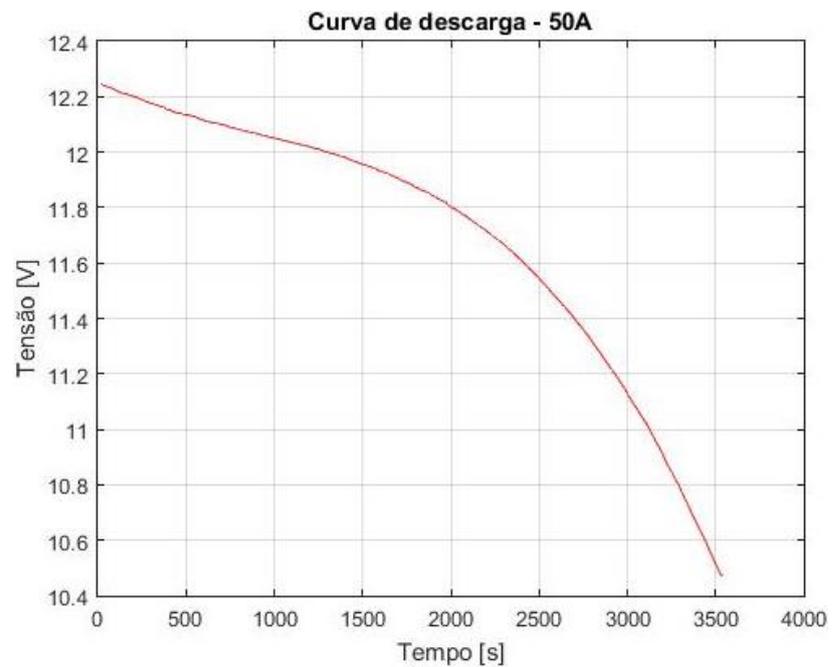
$$R_{00} = \frac{R_0(t_{0+})}{[1 + A_0(1 - SOC)]} \quad (22)$$

4.3 ENSAIO EXPERIMENTAL DE DESCARGA DA BATERIA

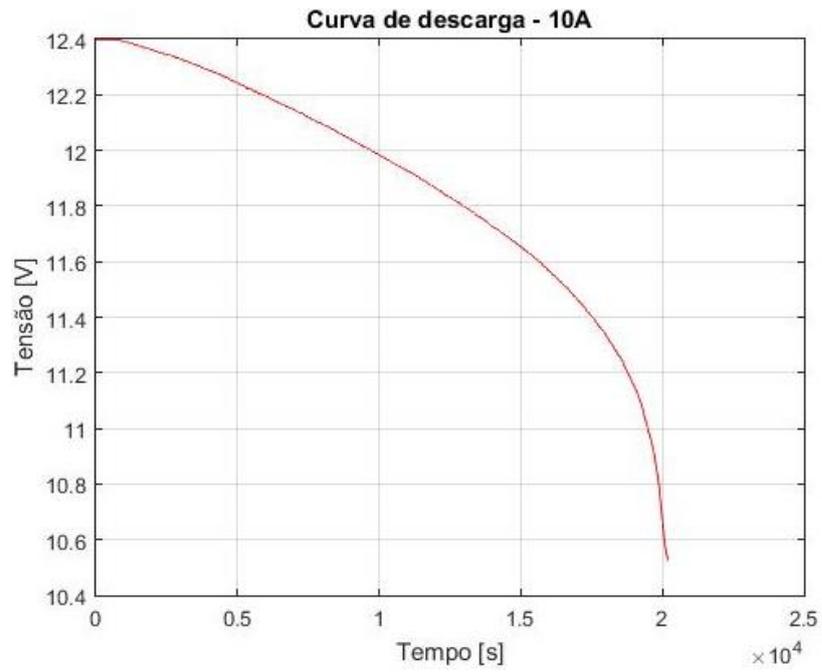
Para esse trabalho foi considerado o estudo de uma bateria do tipo FLA com capacidade nominal de 63 Ah, ensaiada a uma temperatura de 25°C no Laboratório Elétrico do Campo de Provas da General Motors do Brasil (OGAWA, 2011). As curvas de descarga alcançadas experimentalmente foram utilizadas como valor de referência na equação da bateria, sendo geradas a partir de quatro diferentes valores de corrente: 100A / 50A / 10A / 3,15A. Os resultados medidos experimentalmente para cada valor de corrente foram apresentados nas Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

Figura 24 — Curva de descarga a uma corrente constante de 100 A

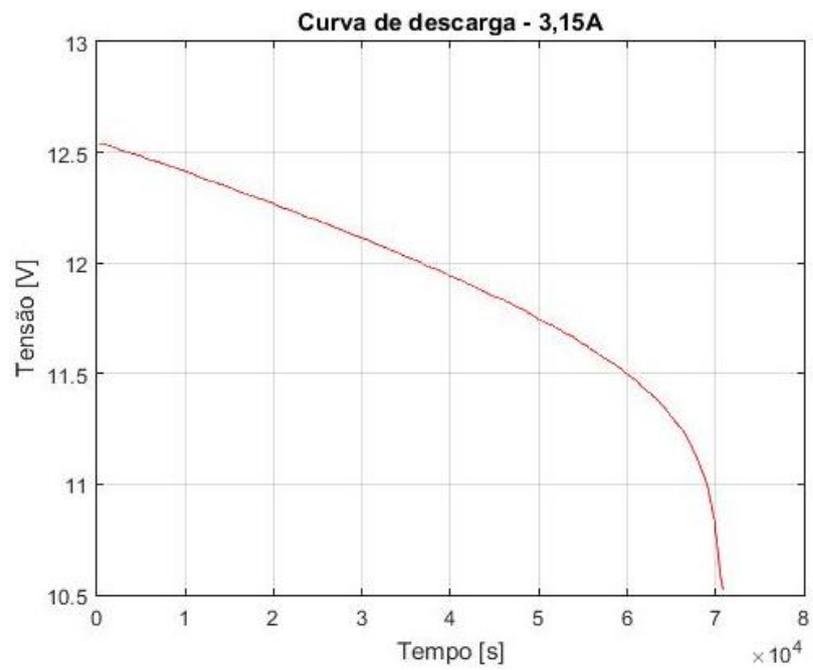
Fonte: Autoria própria

Figura 25 — Curva de descarga a uma corrente constante de 50 A

Fonte: Autoria própria

Figura 26 — Curva de descarga a uma corrente constante de 10 A

Fonte: Autoria própria

Figura 27 — Curva de descarga a uma corrente constante de 3,15 A

Fonte: Autoria própria

4.4 RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DA BATERIA

Para a resolução da expressão matemática que descreve o comportamento de descarga da bateria de chumbo-ácido estudada nesse trabalho será necessário inicialmente avaliar a matriz massa $M(t,y)$ de sua equação, que possui determinante nulo. Com isso, a equação da bateria é classificada como uma equação diferencial algébrica, em que o MATLAB® possui uma família de funções para a resolução desse tipo de equação, utilizando os métodos de Runge-Kutta que calculam uma solução aproximada para sistemas de equações diferenciais através de métodos numéricos iterativos. Para a utilização desse método na equação do comportamento da bateria, o MATLAB® disponibiliza a função ODE15s, em que utiliza o algoritmo NDF (*Numerical Differentiation Formula* – Fórmula de Diferenciação Numérica), indicado como primeira função a ser usada em problemas de equações diferenciais pelo seu baixo grau de complexidade computacional comparado com outras funções, se adequando para modelos em que algumas variáveis do modelo variam rapidamente enquanto outras variam lentamente. Outra opção é a função ODE23t, que utiliza a Regra Trapezoidal de um interpolador livre, sendo indicado para problemas em que uma solução sem amortecimento numérico é aceitável. Essa função é adequada para problemas nos quais algumas variáveis do modelo variam rapidamente enquanto outras variam lentamente.

A equação da bateria será resolvida utilizando a função ODE15s por apresentar um menor processamento computacional, sendo executada pelo MATLAB® de modo mais rápido. Essa solução ficará em função dos parâmetros desconhecidos $[A_0 R_{10} \tau_1 SOC_{t=0} k]$, que serão escolhidos inicialmente de forma aleatória. Dessa maneira, será necessário calcular o erro gerado pela escolha aleatória dos parâmetros desconhecidos e comparar com os valores das tensões medidas experimentalmente, como representado na Equação 23, que busca uma solução ótima para esses parâmetros. Para minimizar o erro será utilizado um método de otimização numérica para aproximar os valores calculados com os valores esperados.

$$\text{Erro} = \frac{\sum_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} (V_{2_{\text{Esperado}}}(t) - V_{2_{\text{Calculado}}}(t))^2}{n} \quad (23)$$

Em que:

$V_{2_{\text{Esperado}}}$ é o valor da tensão medida experimentalmente por meio da curva de descarga;

$V_{2_{calculado}}$ é o valor obtido do cálculo da equação da bateria para um conjunto $[A_0 R_{10} \tau_1 SOC_{t=0} k]$ escolhido;
 n é o número de amostras de V_2 ;

Esse método de otimização envolve um problema de otimização com restrições, pois é necessário estabelecer valores máximos e mínimos para o conjunto $x = [A_0 R_{10} \tau_1 SOC_{t=0} k]$ para que se tenha sentido físico. Para isso será utilizada no MATLAB® a ferramenta Optimtool, que possui um conjunto de algoritmos de otimização, que podem ser aplicados a problemas não lineares com restrição, que são:

- Função Algoritmo genético: Essa função se diferencia dos algoritmos convencionais por não ser baseado na derivada da função, gerando a cada iteração não apenas um candidato, mas uma população de candidatos à solução. Para definir uma escolha, o método se baseia na seleção natural modificando repetidamente a população de soluções, selecionando de forma aleatória os pais por meio de regras de seleção, cruzamento e mutação para ser utilizando para produzir os filhos da próxima geração. Após várias iterações a população evolui na direção da solução ótima (MATLAB, 2022a).
- Função Algoritmo *Simulated Annealing*: Essa função se baseia no processo físico de aquecimento seguido de um resfriamento lento, de modo a minimizar a energia do sistema. A cada iteração, um novo ponto é gerado aleatoriamente e a distância desse novo ponto para o atual é baseada na distribuição de probabilidade proporcional a temperatura. Para evitar mínimos locais e ser capaz de explorar globalmente as soluções, esse método aceita novos pontos menores que o objetivo e alguns pontos maiores que o objetivo. O algoritmo sistematicamente diminui a temperatura e converge para uma solução ótima (MATLAB, 2022b).
- Algoritmo de busca local: Essa função utiliza as informações de gradiente da função objetivo para encontrar o mínimo local dessa função próximo ao ponto x_0 inicial. Representada pela função `fmincon`, utiliza o método de programação quadrática sequencial, baseado nas equações de Karush-Kuhn-Tucker. É considerado o estado da arte entre os métodos não lineares (MATLAB, 2022c).
- Algoritmo de busca direta: Essa função define um conjunto de pontos ao redor do ponto atual buscando um ponto no qual a função objetivo é menor até alcançar a solução ótima. Esse algoritmo não precisa de informações sobre o gradiente da função objetivo para funcionar, o que o torna mais simples de ser aplicado.

As restrições do problema precisam ser feitas de forma coerente, de modo a definir o espaço em que o algoritmo buscará a solução que minimize o erro quadrático médio. Para a obtenção dessas restrições foi necessário aplicar diferentes limites à resolução da equação da bateria, reduzindo e aumentando a escala de variação dos parâmetros, até conhecer os valores máximos e mínimos para cada parâmetro.

As restrições ficaram definidas com o parâmetro A_0 variando de 0.001 a 20, R_{10} de 0.0001 a 10, τ_1 de 100 a 100000, SOC de 0.5 a 1 e o parâmetro k variando de 0.01 a 20. Em que esses limites foram aplicados na Equação 24, função que será otimizada.

$$\min erro = \sum_{t_{inicial}}^{t_{final}} (V_{2Esperado}(t) - V_{2Calculado}(t))^2 \quad (24)$$

A estratégia utilizada para a resolução da equação matemática do comportamento da bateria consiste primeiramente em empregar a função do Algoritmo Genético para encontrar um x_0 próximo a solução ótima e em seguida implementar o algoritmo de busca local, representado pela função *fmincon* com o algoritmo *Active Set* da ferramenta Optimtool do MATLAB® para descobrir a combinação aproximada de parâmetros que geram o menor erro possível na modelagem.

4.5 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

Os melhores resultados do processo de otimização, apresentados em função dos valores de I_2 considerados, são indicados na Tabela 4, e após isso, com esses valores obtidos, são construídas as Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31, comparando os valores calculados com os experimentais.

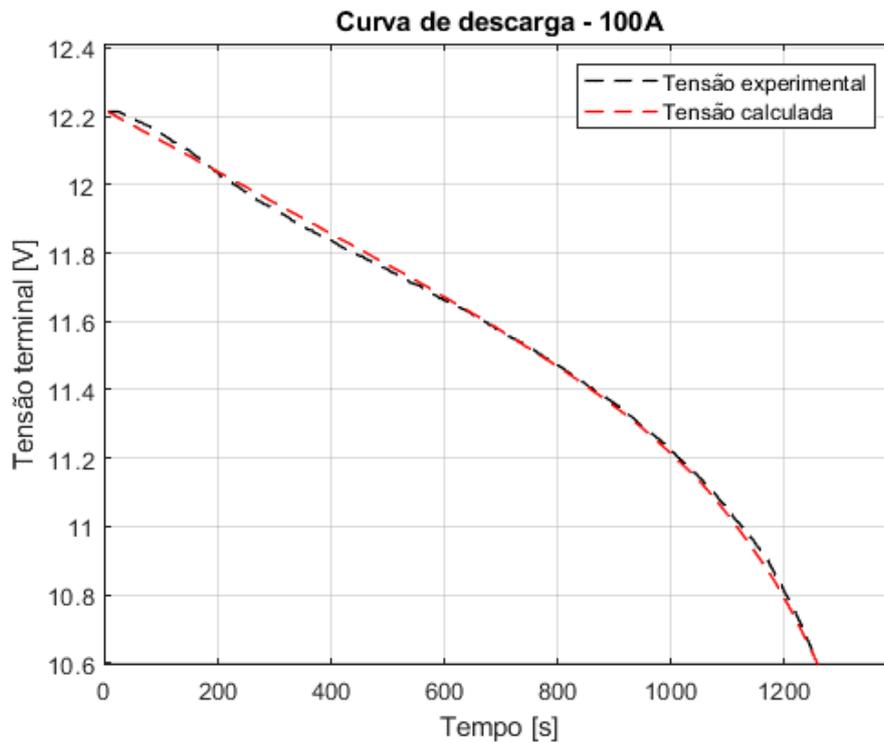
Tabela 4 — Melhores valores para os parâmetros desconhecidos

Descarga	A_0	$R_{10}[\Omega]$	$\tau_1[10^4s]$	$SOC_{t=0}$	k	Erro
$i_2= 100A$	12.97964	0.60292	0.064865	0.815751	13.887052	0,022%
$i_2= 50A$	0.00102	0.14039	0.798181	0.715843	10.144802	0,29%
$i_2= 10A$	0.17447	0.13799	0.787549	0.81903	9.87984	0,83%
$i_2= 3,15A$	0.12173	0.130228	1.011146	0.911228	7.91821	0,26%

Fonte: Autoria própria

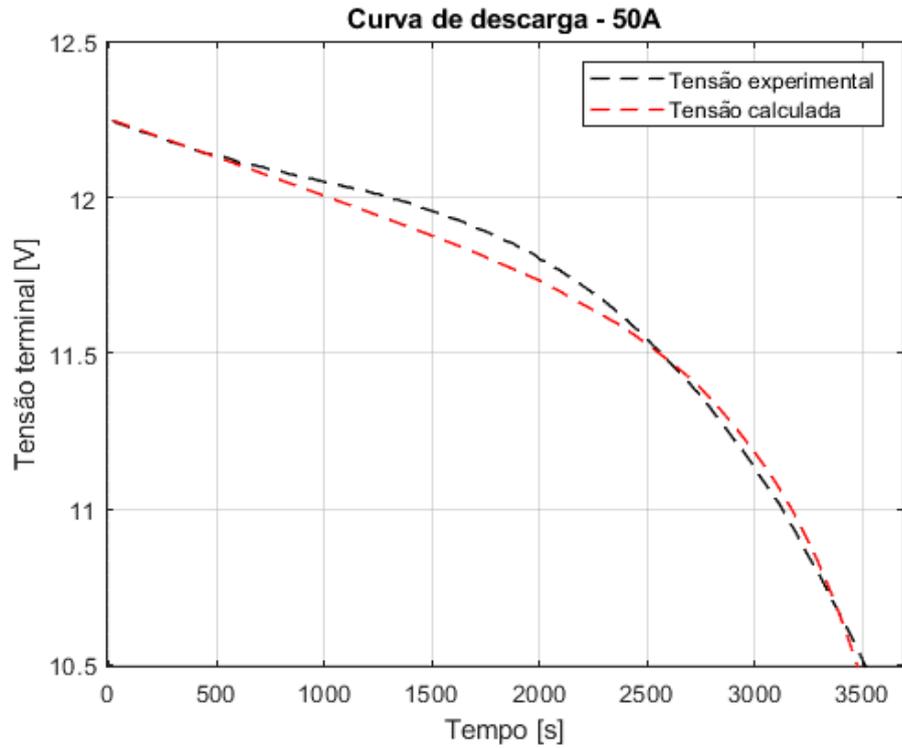
Observando a Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31, é possível verificar a semelhança das curvas obtidas com os valores experimentais e com os valores calculados, isso pode ser refletido na eficiência do método utilizado, que aproximou o máximo possível o comportamento simulado da bateria com o real. Comparando as tensões experimentais e calculadas para uma corrente de 100 A, o erro observado entre essas curvas é de 0,022%, para 50 A de descarga o erro é de 0,29%, para 10 A é de 0,83% e 0,26% para uma corrente de descarga de 3,15 A.

Figura 28 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 100A



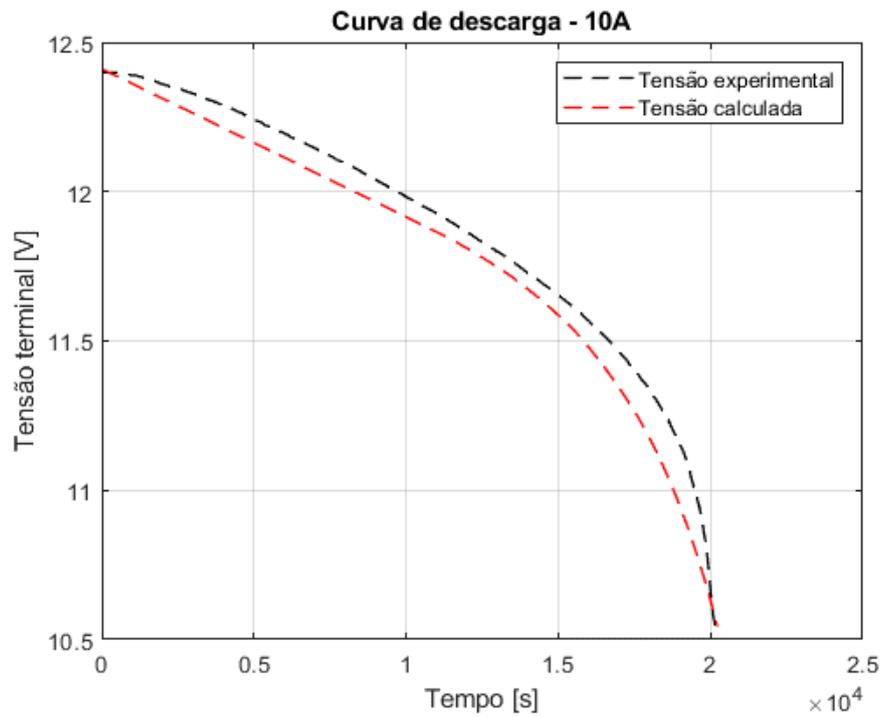
Fonte: Autoria própria.

Figura 29 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 50A



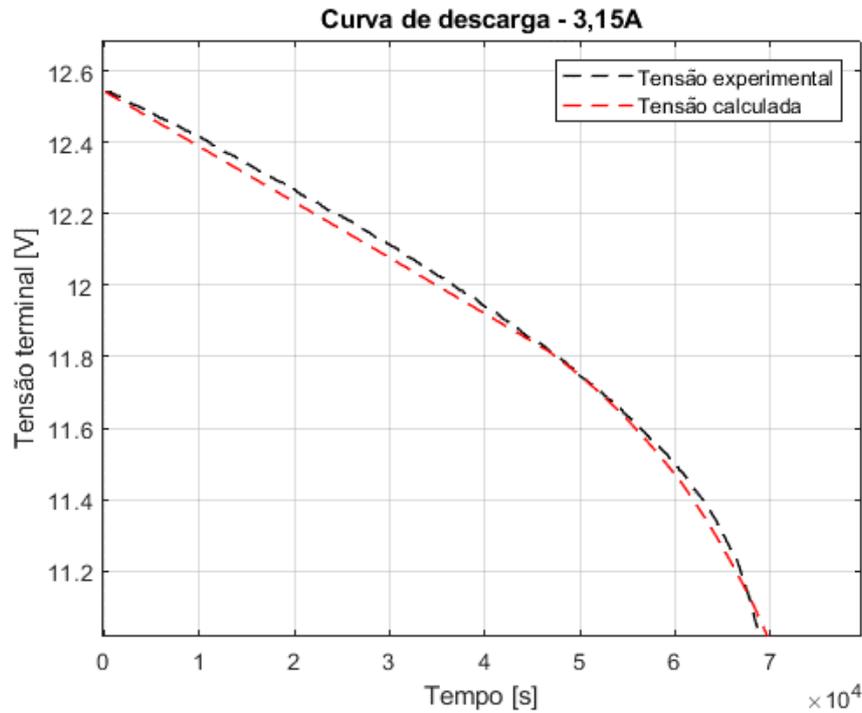
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 10A



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 — Comparação entre as tensões experimentais e calculadas – 3,15 A



Fonte: Autoria própria

4.6 COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DA BATERIA

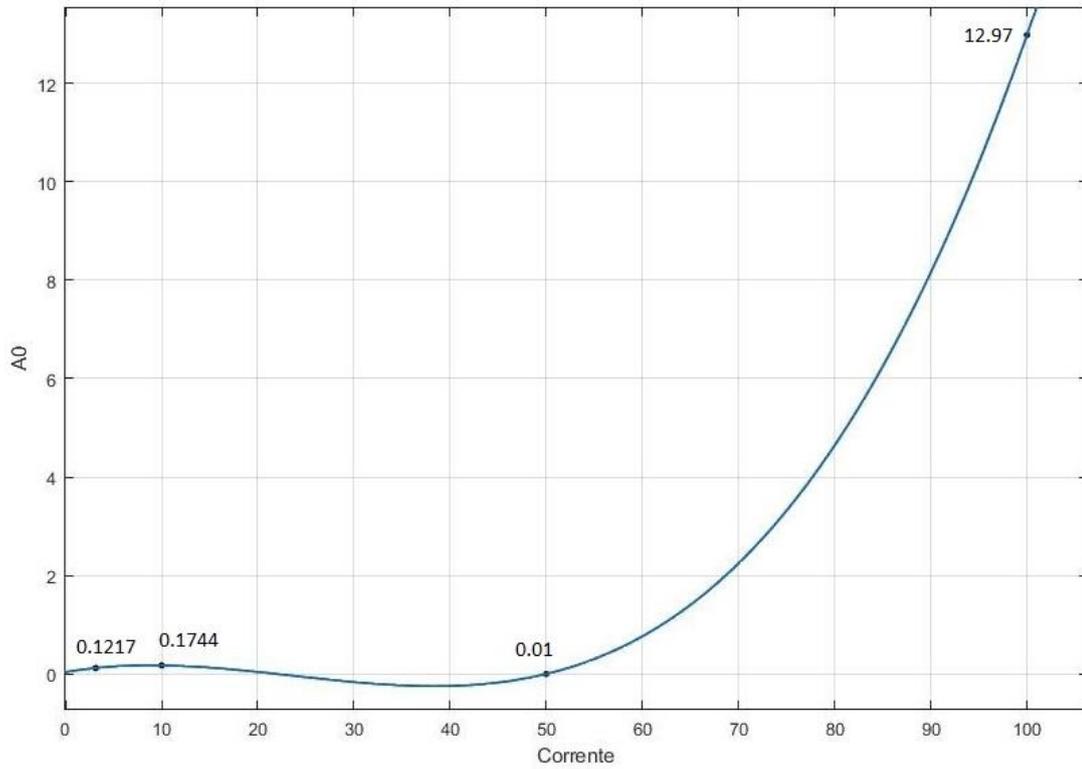
Com os resultados obtidos no processo de otimização descrito anteriormente será esboçado o comportamento de cada parâmetro [A_0 R_{10} τ_1 k R_{00}] da bateria cuja lei de formação era desconhecida, de modo a possibilitar a simulação desse modelo para qualquer corrente de descarga sem a necessidade de avaliar a curva de descarga experimental. Com os dados da Tabela 4 foram geradas as curvas da Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36.

4.6.1 Parâmetro A_0

Analisando os valores de A_0 para as correntes de descarga experimentais de 100 A, 50 A, 10 A e 3,15 A nota-se sua característica polinomial de terceiro grau variando de acordo com a curva azul da Figura 32 representada matematicamente pela aproximação da Equação 25.

$$A_0 = 0.00003293 I_2^3 - 0.002336 I_2^2 + 0.03377 I_2 + 0.03752 \quad (25)$$

Figura 32 — Variação do parâmetro A0



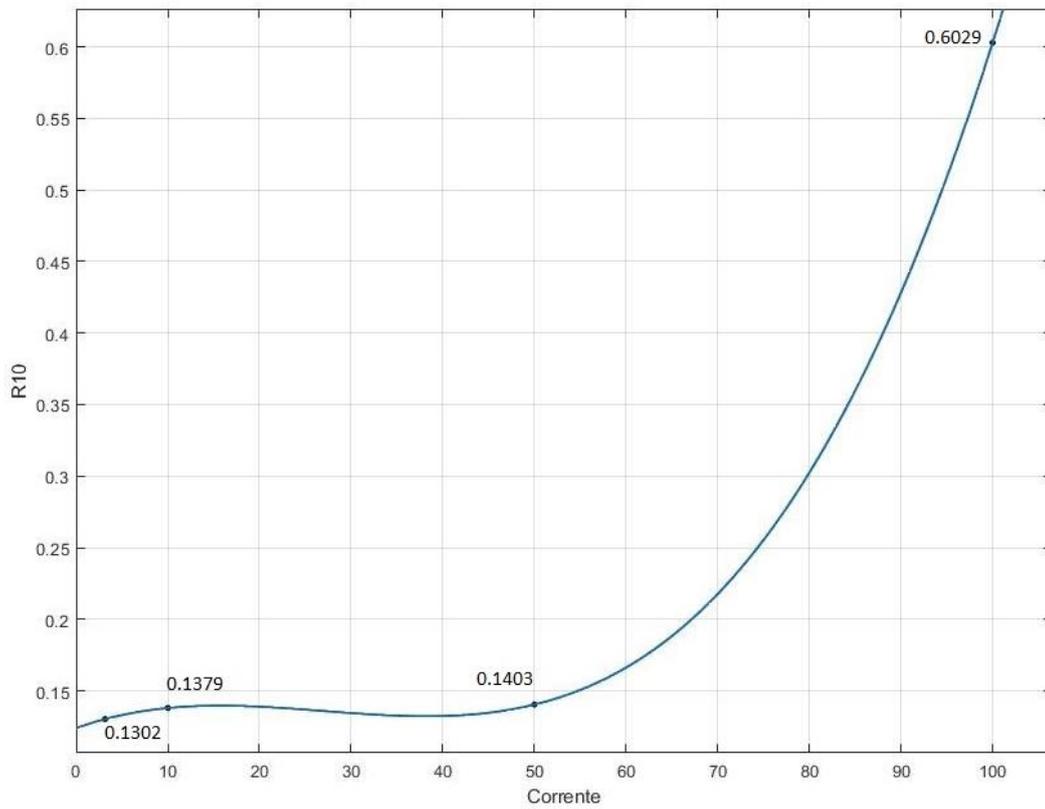
Fonte: Autoria própria.

4.6.2 Parâmetro R10

Analisando os valores de R10 para as correntes de descarga experimentais de 100 A, 50 A, 10 A e 3,15 A nota-se sua característica polinomial de terceiro grau variando de acordo com a curva azul da Figura 33 representada matematicamente pela aproximação da Equação 26.

$$R_{10} = 0.000001291 I_2^3 - 0.0001044 I_2^2 + 0.002324 I_2 + 0.1239 \quad (26)$$

Figura 33 — Variação do parâmetro R10



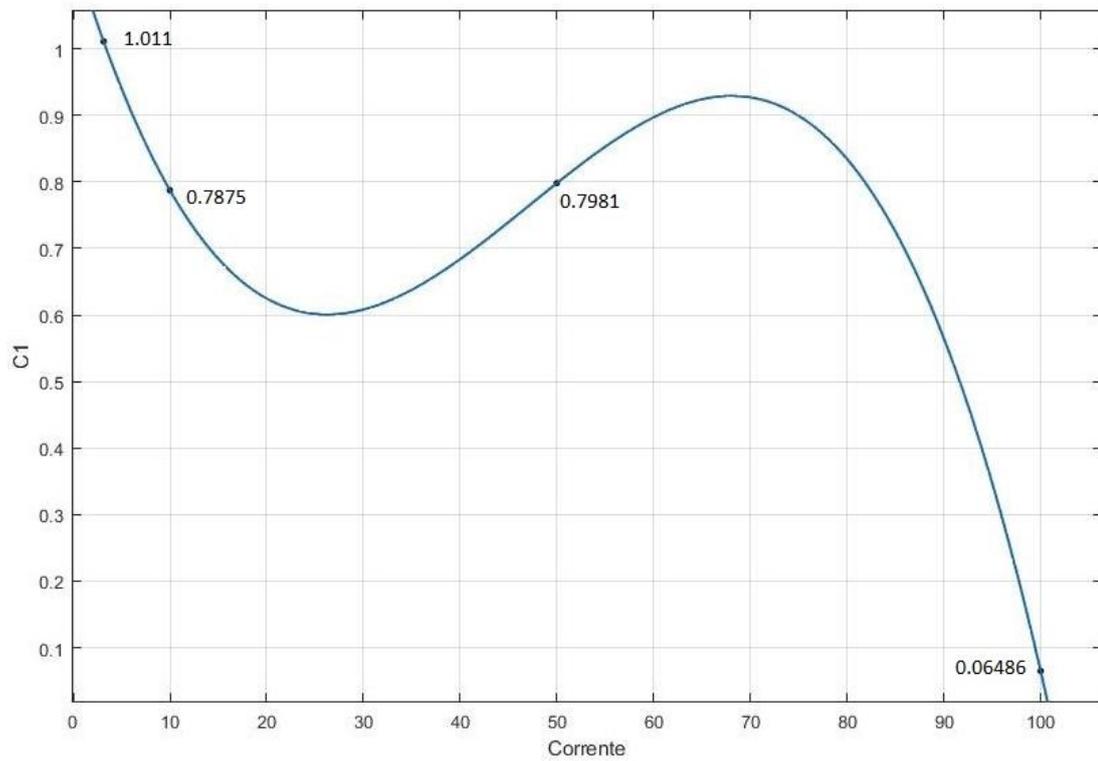
Fonte: Autoria própria.

4.6.3 Parâmetro τ_1

Analisando os valores de C1 para as correntes de descarga experimentais de 100 A, 50 A, 10 A e 3,15 A nota-se sua característica polinomial de terceiro grau variando de acordo com a curva azul da Figura 34 representada matematicamente pela aproximação da Equação 27.

$$\tau_1 = -0.000008966 I_2^3 + 0.001269 I_2^2 - 0.04806 I_2 + 1.15 \quad (27)$$

Figura 34 — Variação do parâmetro C1



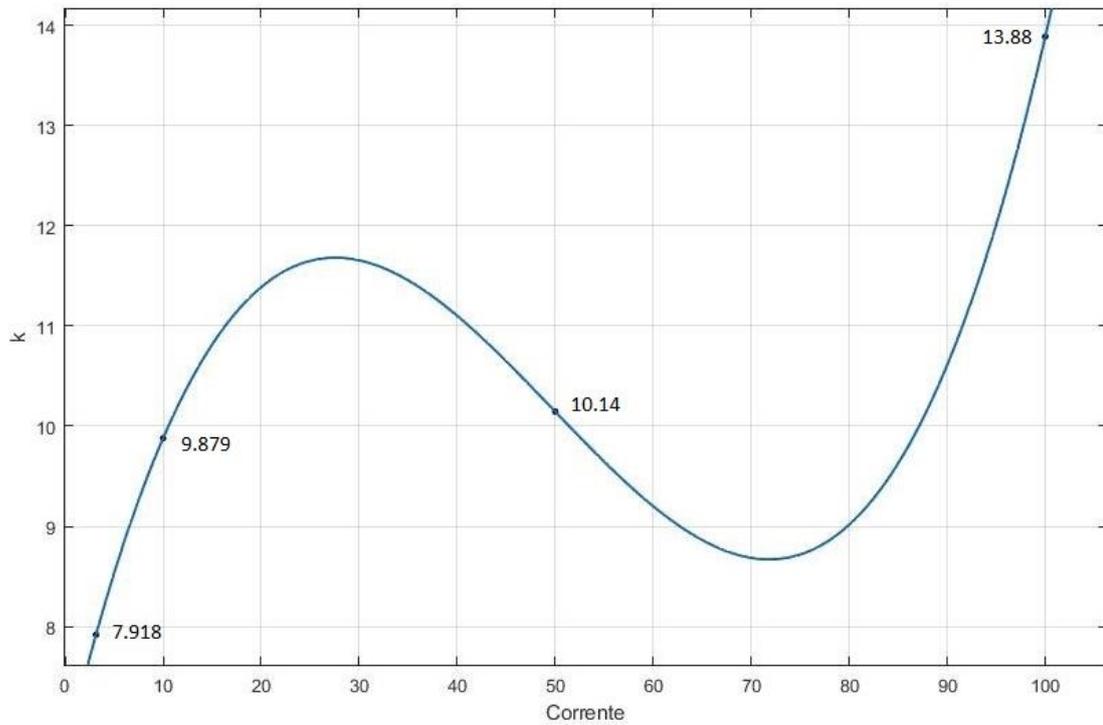
Fonte: Autoria própria

4.6.4 Parâmetro k

Analisando os valores de k para as correntes de descarga experimentais de 100 A, 50 A, 10 A e 3,15 A nota-se sua característica polinomial de terceiro grau variando de acordo com a curva azul da Figura 35 representada matematicamente pela aproximação da Equação 28.

$$k = 0.00006948 I_2^3 - 0.01036 I_2^2 + 0.4128 I_2 + 6.719 \quad (28)$$

Figura 35 — Variação do parâmetro k



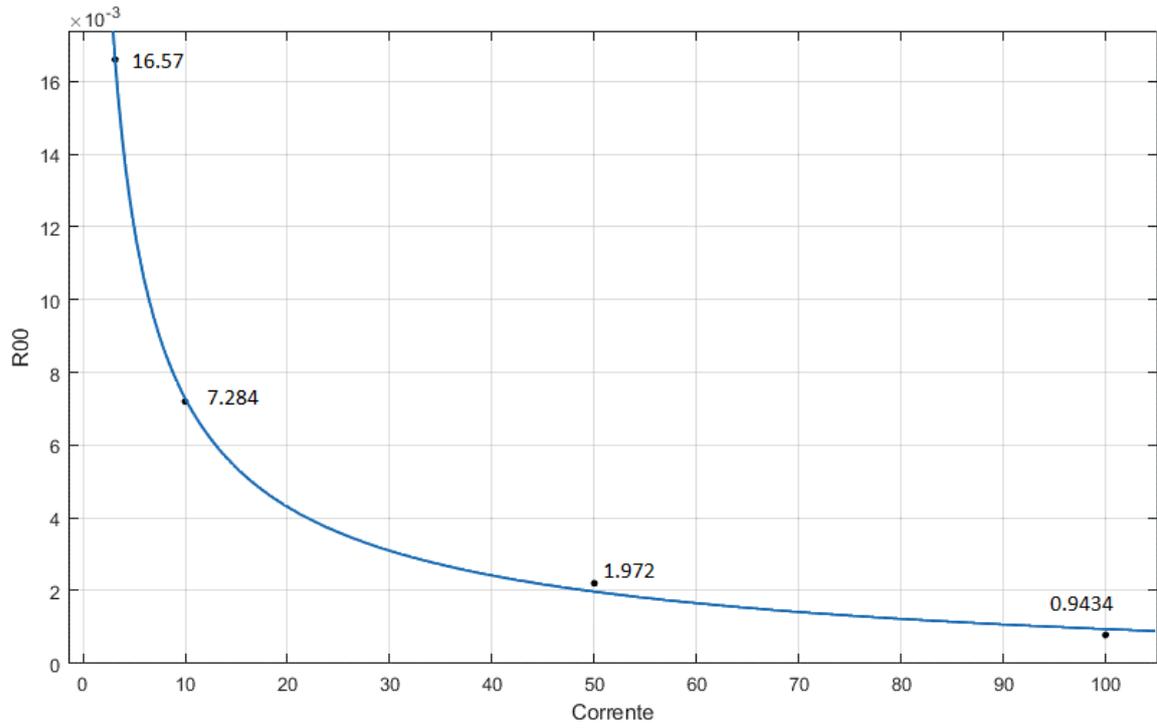
Fonte: Autoria própria.

4.6.5 Parâmetro R00

Analisando os valores de R00 para as correntes de descarga experimentais de 100 A, 50 A, 10 A e 3,15 A nota-se sua característica de série de potência variando de acordo com a curva azul da Figura 36 representada matematicamente pela aproximação da Equação 29 com dois termos.

$$R_{00} = 0.03716 I_2^{-0.661} - 0.000827 \quad (29)$$

Figura 36 — Variação do parâmetro R00



Fonte: Autoria própria

5 MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS – MODELO JACKEY NO AMBIENTE SIMULINK

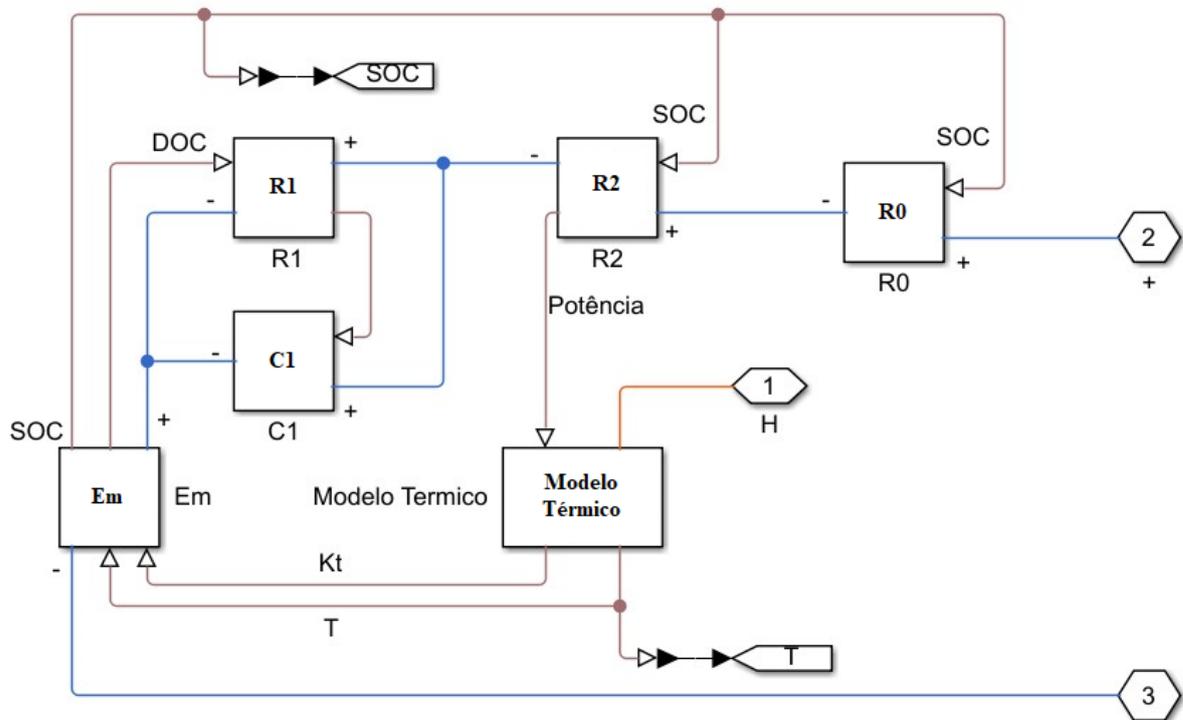
A modelagem de bateria é um processo muito importante na simulação dos sistemas elétricos, sendo necessário um modelo que atenda com fidelidade as respostas reais esperadas, para que assim, gere resultados significativos para o projeto. Como no capítulo anterior, foi feita a validação da modelagem da bateria por meio do equacionamento na linguagem de códigos do MATLAB®, o próximo passo será trazer essa simulação para o ambiente do Simulink, de modo a facilitar a sua visualização e interação com outros modelos elétricos. Para isso, será necessário representar os componentes elétricos que compõem o modelo por meio de blocos com as funções matemáticas que os representam.

5.1 CIRCUITO PRINCIPAL DO MODELO

Para a construção desse modelo serão considerados os aspectos elétricos e termodinâmicos da bateria, de modo a representar de forma mais íntegra o seu comportamento real e suas mudanças de temperatura. O circuito principal do modelo é o mesmo apresentado anteriormente na Figura 20 e a partir dele será construída a simulação no ambiente Simulink, como retratado na Figura 37.

Nesse novo ambiente de simulação, as equações de cada parâmetro precisam ser implementadas em um bloco com uma função matemática customizada. Para isso, foi utilizado o Simulink *MATLAB® System*, cuja função é modelar matematicamente o comportamento de um bloco por meio de script na linguagem MATLAB®. Dessa forma, será utilizado esse procedimento para representar a não linearidade dos componentes que constituem a bateria, criando um bloco específico para cada função desejada. Nessa nova modelagem inserida no ambiente Simulink, será adicionada na sua representação uma variação dos parâmetros com a temperatura, além da resistência R2 retirada anteriormente.

Figura 37 — Circuito equivalente do modelo no ambiente Simulink



Fonte: Autoria própria

O bloco R2 representa a segunda resistência do ramo principal, sendo influenciada pela corrente de que flui por ela e aumentada exponencialmente conforme o estado de carga da bateria aumenta, afetando diretamente no processo de carregamento da bateria. A equação que representa o seu comportamento é apresentada na Equação 30 (JACKEY, 2007).

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp [A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp (A_{22}I_m/I^*)} \quad (30)$$

Em que:

R_2 é a segunda resistência do ramo principal;

R_{20} é uma constante;

A_{21} é uma constante;

A_{22} é uma constante;

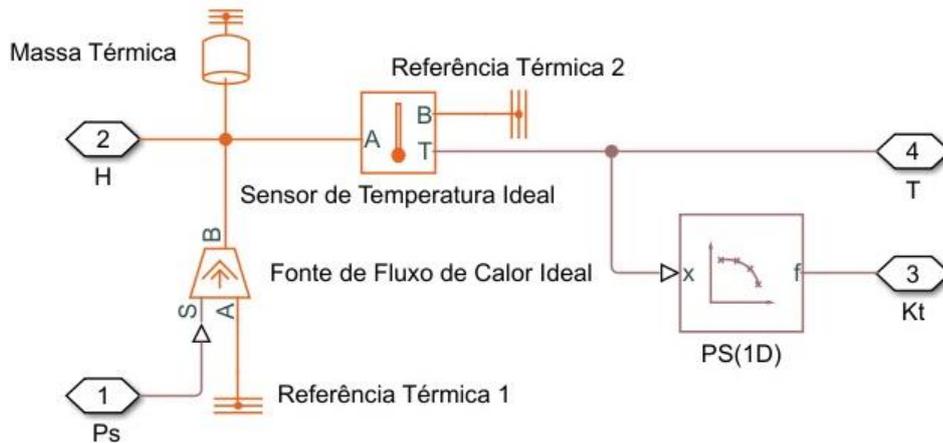
I_m é a corrente do ramo principal;

I^* é a corrente nominal da bateria;

5.2 MODELAGEM TÉRMICA DA BATERIA

O bloco responsável por implementar o modelo térmico da bateria é composto pelo circuito apresentados na Figura 38 e representa o modelo de variação de temperatura do eletrólito da bateria.

Figura 38 — Circuito de temperatura do eletrólito



Fonte: Autoria própria.

Para simplificar o entendimento do bloco, será descrito a função de cada componente que o compõe. A equação que representa o comportamento da mudança de temperatura no eletrólito devido as perdas resistivas internas e temperatura ambiente é apresentada na Equação 31 (JACKEY, 2007).

$$\theta(t) = \theta_{init} + \int_0^t \frac{\left(P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_e} \right)}{C_\theta} dt \quad (31)$$

Em que:

θ é a temperatura da bateria em °C;

θ_a é a temperatura ambiente em °C;

θ_{init} é a temperatura inicial da bateria em °C que foi considera igual a ambiente;

P_s é a perda de potência I^2R de R_0 e R_2 em Watts;

R_e é a resistência térmica em °C/Watts;

C_θ é a capacitância térmica em Joules / °C;

τ é a variável de tempo de integração;

5.2.1 Massa Térmica

Esse bloco representa a capacidade de um material ou combinação de materiais de armazenar energia interna, sendo caracterizada pela massa do material e seu calor específico. Esse bloco possui uma porta de conservação térmica, a direção positiva do bloco é de sua porta em direção ao bloco.

5.2.2 Fonte de fluxo de calor ideal

Esse bloco representa uma fonte ideal de energia térmica que independente da diferença de temperatura na fonte é suficiente para manter o fluxo de calor específico em sua saída. A conexão S da fonte configura uma porta de sinal física e as conexões A e B correspondem às portas de conservação de entrada e saída térmicas. O fluxo de calor através da fonte é diretamente proporcional ao sinal de controle e fluindo de A para B na direção positiva.

5.2.3 Referência térmica

Esse bloco representa um ponto de referência térmica, ou seja, um ponto de temperatura zero ou constante, para o qual a partir dele são determinadas todas as temperaturas do sistema.

5.2.4 Sensor de temperatura ideal

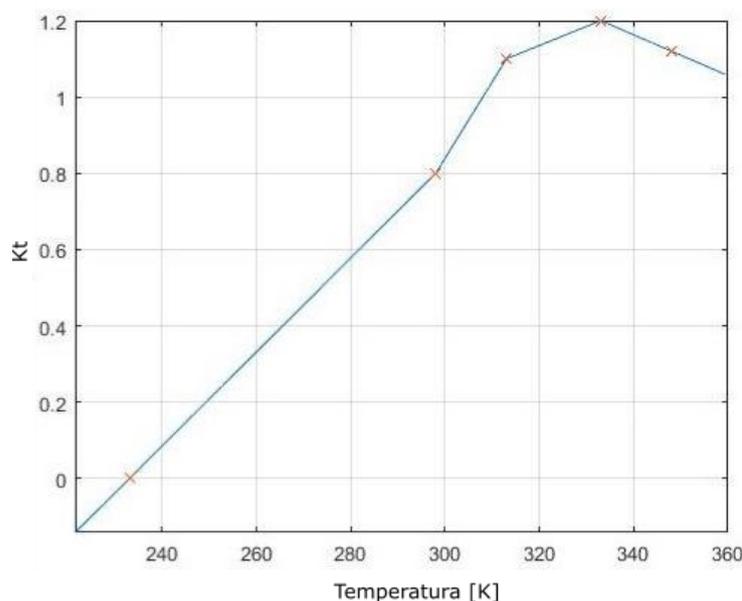
Esse bloco representa um sensor de temperatura ideal, ou seja, ele é um dispositivo que determina o diferencial de temperatura entre dois pontos sem extrair o calor deles. Ele é composto por três portas, sendo as conexões A e B as portas térmicas conservadoras e o sinal são retornados pela porta de sinal físico T. A orientação do sensor é de A para B e a temperatura medida é equacionada por $T = T_A - T_B$.

5.2.5 Bloco PS(1D)

Esse bloco representa um conversor ideal cuja relação de entrada e saída é apresentada por uma função de pesquisa em que tanto a entrada como a saída são sinais físicos. Dessa forma,

esse bloco funciona para apresentar a não linearidade de K_t , sendo a entrada do sistema a temperatura e a saída o valor de K_t para essa determinada temperatura encontrada. A função de K_t com a temperatura é apresentado na Figura 39.

Figura 39 — Variação de K_t com a temperatura.

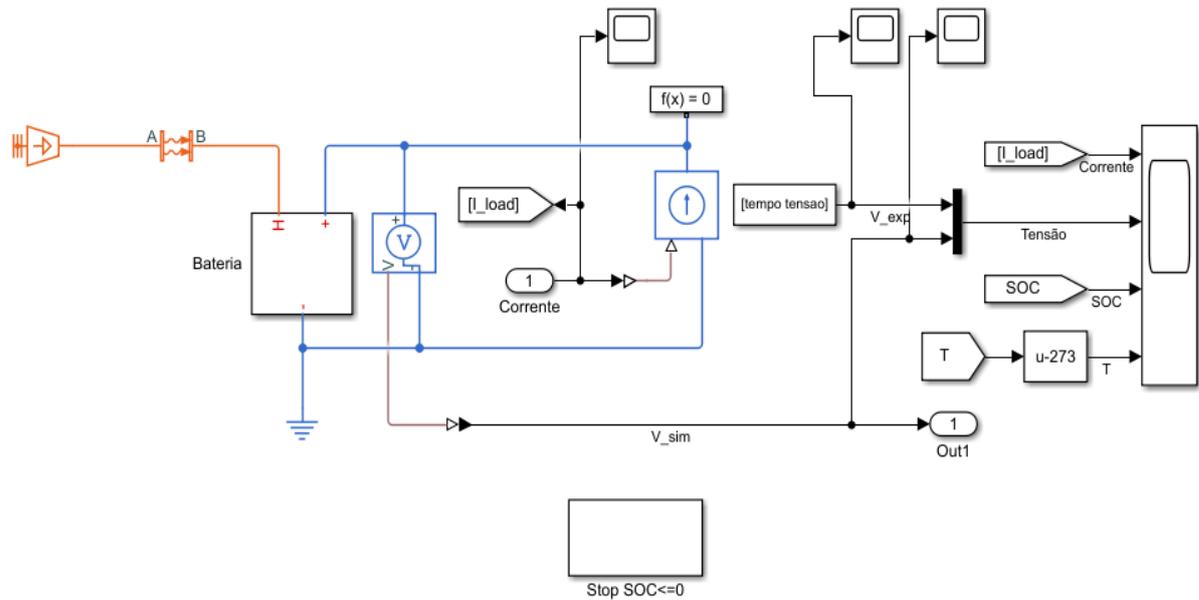


Fonte: (JACKEY, 2007)

5.3 AMBIENTE DE CALIBRAÇÃO DA BATERIA

Após a construção do modelo por meio dos blocos no Simulink será necessário à sua calibração para os parâmetros reais do sistema, analisando quais são conhecidos e utilizando métodos de otimização para determinar os parâmetros desconhecidos. Para ser feita a calibração do modelo será preciso construir um cenário de testes no ambiente do Simulink, o qual seja possível injetar no modelo uma corrente conhecida e analisar o seu comportamento de tensão, comparando o seu desempenho com as curvas reais do projeto. O ambiente utilizado para a simulação controlada do modelo é apresentado na Figura 40.

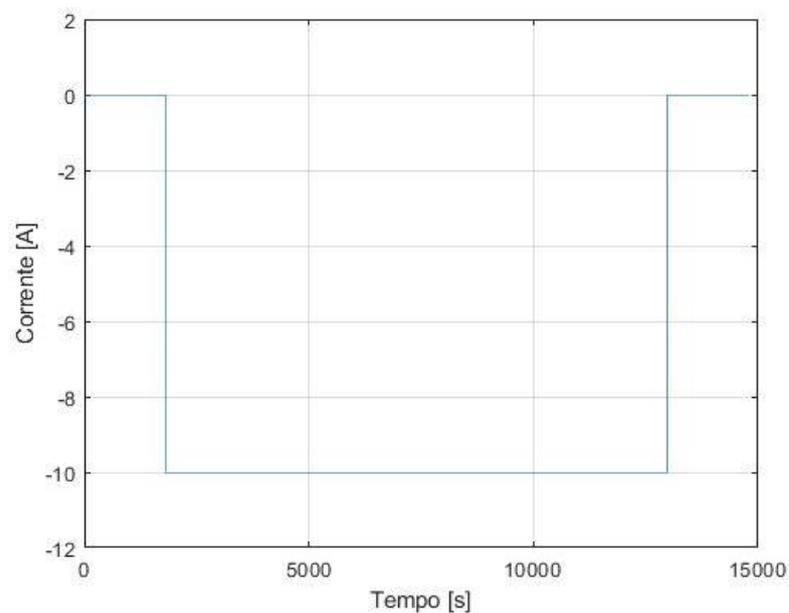
Figura 40 — Ambiente de calibração da bateria



Fonte: Autoria própria

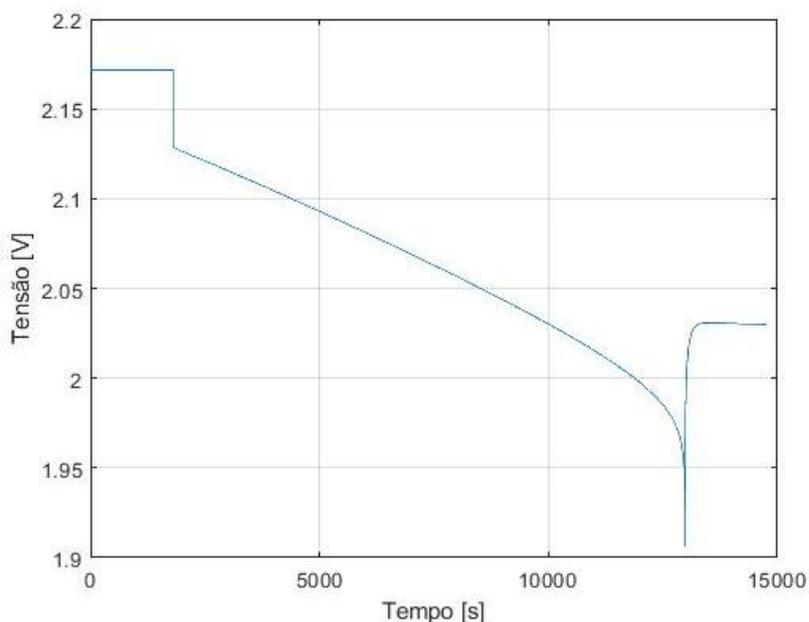
De forma semelhante feito anteriormente no ambiente do MATLAB®, para a calibração da bateria será necessário submeter a bateria a uma descarga conhecida e comparar o resultado simulado com o experimental. Para isso será utilizado uma descarga constante de 10 A, apresentada na Figura 41 e o resultado da simulação será comparado com a curva experimental apresentada na Figura 42.

Figura 41 — Corrente de descarga constante 10 A



Fonte: Autoria própria

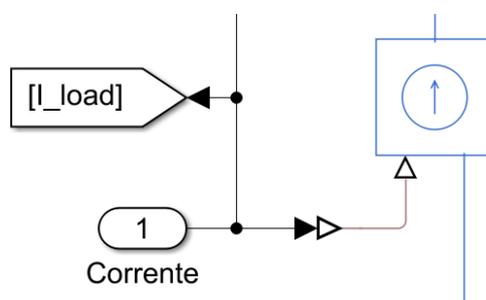
Figura 42 — Curva de descarga com 10 A



Fonte: (JACKEY, 2007)

A curva da Figura 41 é inserida no modelo pelo bloco de *input corrente*, que foi configurado por meio do *Data Import / Export* do Simulink. Essa corrente serve de alimentação para uma fonte de corrente controlada, representada pelo bloco *Controlled Current Source*, injetando a corrente fornecida no modelo da bateria. Esse conjunto é apresentado na Figura 43.

Figura 43 — Conjunto responsável por injetar corrente no modelo.

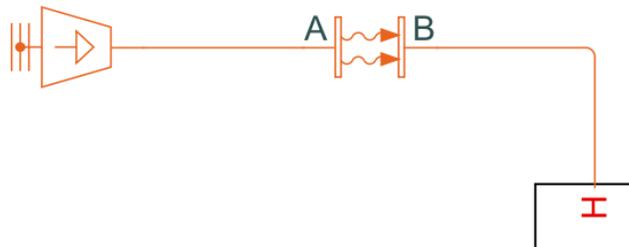


Fonte: Autoria própria

O segundo conjunto construído para o processo de calibração da bateria foi o modelo térmico externo da bateria, que pode ser apresentado na Figura 44. Esse modelo é composto pela fonte de temperatura, que representa uma fonte de energia ideal em uma rede térmica que pode manter uma temperatura absoluta constante em seus terminais, independentemente da taxa de fluxo de calor e o bloco de transferência de calor por convecção, responsável pela transferência de calor entre dois corpos por meio do movimento do fluido, sendo as conexões

A e B suas portas de conservação térmica e os pontos os quais ocorre a transferência de calor, sendo de A para B o seu sentido positivo.

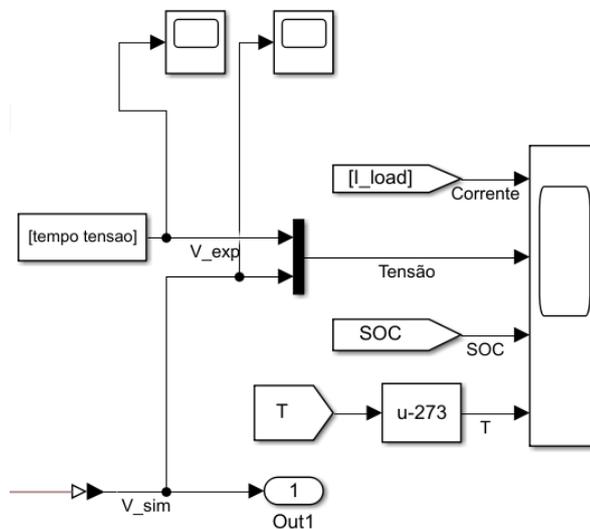
Figura 44 — Conjunto térmico externo da bateria



Fonte: Autoria própria

O terceiro conjunto construído para a calibração da bateria foi o de medição, que é apresentado na Figura 45 sendo composto pelo bloco *From Workspace*, responsável por reproduzir os dados de descarga experimental da Figura 42, *PS-Simulink Converter*, cuja função é converter um sinal físico de entrada em um sinal de saída Simulink, o *Mux*, que funciona como um multiplexador de sinais e os *Scopes*, que tem função de permitir a visualização do sinal.

Figura 45 — Conjunto de medição

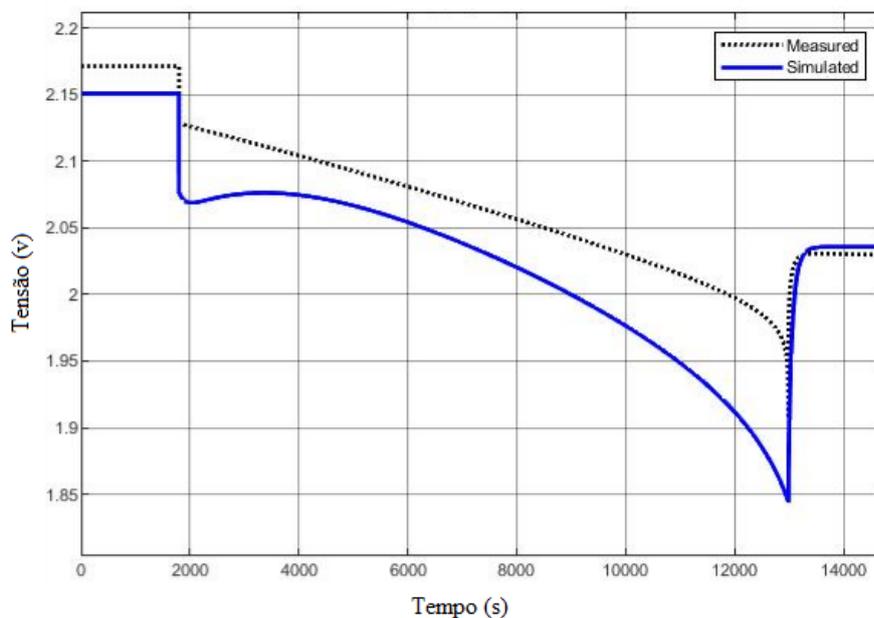


Fonte: Autoria própria

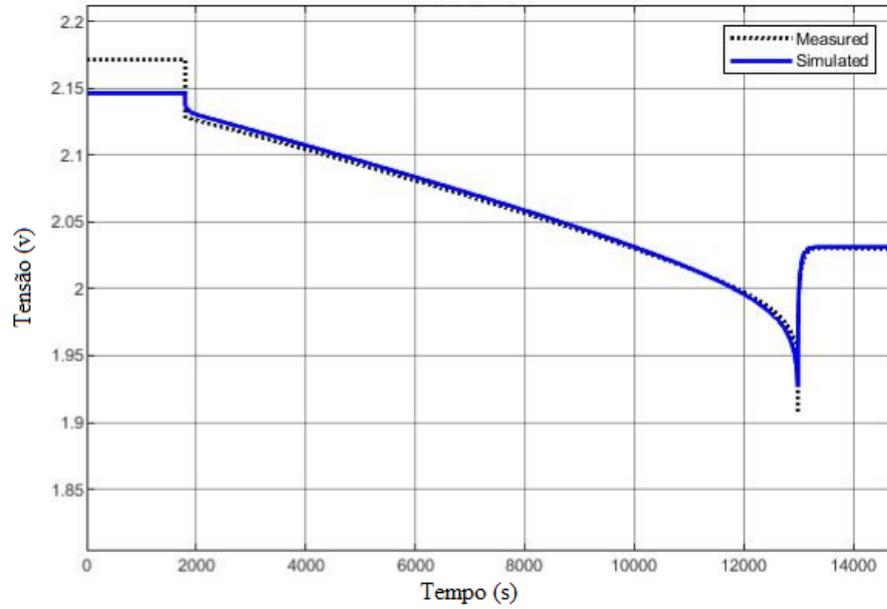
5.4 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

Feita a apresentação de todos os componentes que constituem o modelo de calibração, foi preciso desenvolver uma rotina de códigos no ambiente do MATLAB® com os valores dos parâmetros conhecidos e estimar valores iniciais para os parâmetros desconhecidos. Para estimar os valores dos parâmetros desconhecidos utilizado a função de otimização *Parameter Estimation* do Simulink, será necessário adicionar a variação de cada parâmetro estimado para ser feita a comparação com a curva experimental do comportamento da bateria. Na Figura 46 é apresentado na cor cinza a curva com o comportamento real da bateria com uma descarga de 10 A e de azul a curva simulada a partir do modelo desenvolvido antes do processo de otimização, com valores aleatórios para os parâmetros desconhecidos. Esses parâmetros do método que devem passar pelo processo de otimização são: $x = [A_0, A_{21}, A_{22}, R_{10}, R_{20}, \tau_1, SOC_{t=0}, k]$. Para a obtenção dessas restrições foi necessário aplicar variados limites a resolução da função que descreve o comportamento da bateria, de modo a aumentar e reduzir escalas de variação dos parâmetros, além de tentativa e erro até conhecer os valores máximos e mínimos para cada parâmetro.

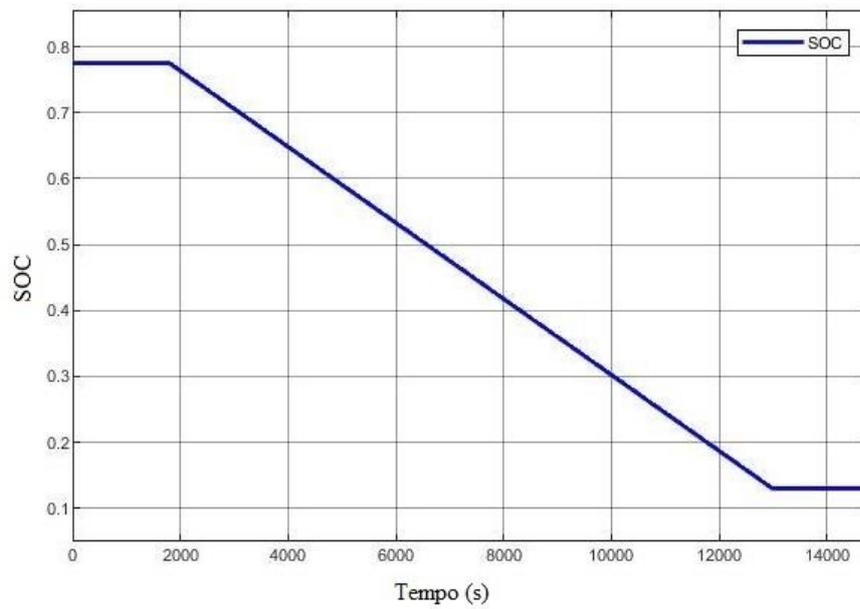
Figura 46 — Curva de tensão antes do processo de otimização



Fonte: Autoria própria

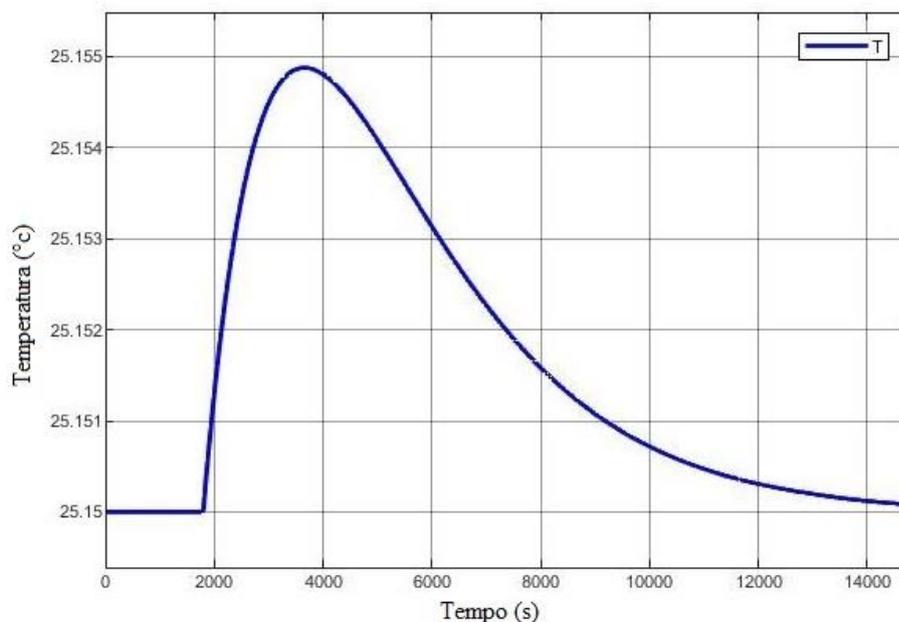
Figura 47 — Curva de tensão após o processo de otimização

Fonte: Autoria própria

Figura 48 — Curva do estado de carga

Fonte: Autoria própria

Figura 49 — Curva da temperatura



Fonte: Autoria própria

No experimento foram utilizadas as curvas de corrente e tensão reais da bateria apresentadas na Figura 41 e Figura 42, respectivamente. Após o processo de otimização, o resultado das iterações aplicadas ao modelo ensaiado é apresentado na Figura 47, sendo notada a aproximação dos resultados simulados com os experimentais. Vale destacar uma pequena diferença em relação ao valor de tensão de circuito aberto no início da simulação, que não é o foco da modelagem do problema, sendo essa diferença irrelevante para a análise.

Verificando o *scope* do ambiente de calibração da bateria, são observados os resultados apresentados na Figura 48 e Figura 49. Na Figura 48, é representado o estado de carga inicial do experimento, em que a bateria estava com uma carga de 80% de sua capacidade e no fim da descarga passa para 20%, se comportando de forma linear como expressado anteriormente na análise dos parâmetros. Já na Figura 49, é apresentada a curva da temperatura durante o processo de descarga causada pela sua resistência interna, que diante do longo período do experimento não apresenta mudanças significativas na temperatura interna da bateria. Dessa forma, o experimento comprova o desempenho da simulação em reproduzindo de modo integro o comportamento real da bateria de chumbo ácido.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso foi obtida uma construção sólida do conhecimento sobre o estado da arte das tecnologias de armazenamento de energia com o estudo sobre o armazenamento por bombeamento hidráulico, compressão de ar, volantes de inércia, e baterias de íons de lítio, fluxo redox e chumbo-ácido, sendo necessário para cada aplicação específica um detalhamento sobre as opções de tecnologias que melhor atendam às necessidades a serem atendidas. Em especial, vale destacar o lento tempo de resposta e elevado tempo de descarga dos sistemas CAES e PHS, sendo voltados para aplicações de gestão de energia, além dos sistemas FESS, SMES e DLC com curto tempo de descarga e resposta, fornecendo uma elevada densidade de potência em pequenos intervalos de tempo, apresentando aplicações voltadas à regulação de frequência e controle de tensão. Já o BESS e o FC apresentam um tempo de resposta e descarga nem tão curta e nem tão longas, sendo ideais para funções de suporte à operação de sistemas elétricos, cujos estudos dessas características são fundamentais para a modelagem de baterias de chumbo-ácido realizada no presente trabalho.

Para o desenvolvimento da simulação do sistema de armazenamento por baterias foi escolhida a tecnologia de baterias de chumbo-ácido pelo seu consolidado tempo de mercado e utilização em diversas aplicações comuns no cotidiano. Com isso, foi elaborado o estudo das opções de modelos capazes de descrever as características dessa tecnologia de armazenamento, permitindo um maior conhecimento de seus componentes e comportamentos, sendo apresentados os modelos de Ceraolo, Durval, Casacca, Salameh e Lynch; Esfahanian, Torabi e Mosahebi; Shepherd-Schiffer e modelo de Jackey. É importante destacar que os modelos basicamente são desenvolvidos por meio da modelagem por circuito equivalente de *Thevenin*, baseados em impedância ou baseados em tempo de execução, sendo o modelo Esfahanian, Torabi e Mosahebi desenvolvido a partir da dinâmica computacional dos fluidos e no modelo de circuito equivalente, tornando a simulação rápida e precisa. Além disso, o modelo Shepherd-Schiffer tem como objetivo possibilitar determinar o tempo de vida útil das baterias de chumbo-ácido fazendo a comparação dos impactos de diferentes condições operacionais, tamanhos de sistemas e diferentes tecnologias envolvidas na sua fabricação, ponderando a taxa de transferência de corrente por hora da bateria.

Já o modelo Jackey tem como proposta simular o sistema com objetivo de implementar um modelo rápido, simples e que consiga suprir as necessidades de simulações do sistema elétrico de modo geral. Para isso, utilizando como base um circuito equivalente composto por

resistores, capacitores e fonte de tensão, foi modelado o comportamento real de descarga da bateria sem a necessidade de análises físico-químicas das células que a compõe, facilitando a sua simulação no ambiente elétrico. Para modelagem do projeto foi escolhido o software MATLAB®/Simulink, sendo inicialmente utilizada a modelagem por linhas de código para o entendimento do comportamento dos componentes e validação da simulação, e posteriormente passado para o ambiente do Simulink, no qual foi possível modelar o projeto de forma mais compreensível por meio de blocos. As principais dificuldades de implementação do método foram a limitada quantidade de curvas de descargas experimentais para as simulações, sendo apenas as curvas de 100 A, 50 A, 10 A e 3,15 A, dificultando na modelagem do comportamento dos parâmetros que não possuem leis de formação conhecidas. Com isso, para cada parâmetro desconhecido foi possível gerar apenas quatro pontos para sua interpolação, implicando diretamente na sua assertividade, pois idealmente quanto mais pontos fosse composta a curva, melhor seria a descrição de seu comportamento. Além disso, vale destacar a dificuldade em se delimitar de forma coerente as variações de cada parâmetro para possibilitar o algoritmo de otimização apresentar o menor erro quadrático, sendo necessário aplicar diferentes limites a resolução da equação da bateria, reduzindo e aumentando a escala de variação dos parâmetros, até conhecer os valores máximos e mínimos para cada parâmetro. Utilizar o método de Jackey proporcionou desenvolver uma simulação de bateria com erros abaixo de 1%, sendo para esse trabalho um ótimo resultado, refletindo a assertividade na descrição dos parâmetros escolhidos para modelar o seu comportamento.

REFERÊNCIAS

- ALZOLA, Rafael Peña *et al.* Review of flywheel based energy storage systems. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ENGINEERING, ENERGY AND ELECTRICAL DRIVES*, 2011, Malaga. **Anais [...]**. Malaga: IEEE, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6036455/>. Acesso em: 21 ago. 2020
- ARAUJO, M. A., **Metodologia baseada em medidas dispersas de tensão e árvores de decisão para localização de faltas em sistemas de distribuição modernos**. 2017. Tese (Doutorado em ciências, Programa de Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-20112017-103816/>. Acesso em: 30 nov. 2022.
- BAZAN, Selma Fabiana. **Mecanismo de reação catódica em baterias recarregáveis a base de azul da prússia - uma abordagem DFT**. Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/SFSA-B45MXM>. Acesso em: 24 mar. 2020.
- BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. **Química Nova na Escola**, n. 11, p. 3-9, 2000.
- BOSCH, Robert. **Manual de baterias BOSCH**. São Paulo: [s. n.], 2007. *E-book* (26 p.). Disponível em: <https://silo.tips/download/manual-de-baterias-bosch>. Acesso em: 24 ago. 2021.
- BUENO, A.F.M; BRANDÃO, C.A.L. **Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no brasil**. Belo Horizonte: ABAQUE, 2017. 62p. Disponível em: http://abaque.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf. Acesso em: 24 mar. 2020.
- CANALES, Fausto Alfredo; BELUCO, Alexandre; MENDES, Carlos André Bulhões. Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1230-1249, mai-ago 2015.
- CARNEIRO, Rafael Luiz *et al.* Essential aspects of lead-acid batteries and physical-chemical and thermodynamic principles of its operation. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, p. 889-911, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170057>. Acesso em: 24 mar. 2020.
- CERAOLO, M. New dynamical models of lead-acid batteries. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 4, p. 1184-1190, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/59.898088>. Acesso em: 25 jan. 2020.

CHEN, Haisheng *et al.* Progress in electrical energy storage system: a critical review. **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 3, p. 291-312, mar. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>. Acesso em: 20 abr. 2022.

CHEN, M.; MORA, G. A. Rincon. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance. **IEEE transactions on energy conversion**, v. 21, n. 2, p. 504-511, jun. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tec.2006.874229>. Acesso em: 14 jan. 2021.

COSTA, Gustavo Santos. **Viabilização da aplicação volante de inércia de alta velocidade em locomotivas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26627>. Acesso em: 30 nov. 2022.

COSTA, Pablo Fernando Soardi *et al.* Conversor dab aplicado à carga de banco de baterias em uma microrrede com geração fotovoltaica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: Universidade Federal de Santa Maria, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/291>. Acesso em: 21 ago. 2020.

DÍAZ-GONZÁLEZ, Francisco *et al.* A review of energy storage technologies for wind power applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 2154-2171, maio 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>. Acesso em: 2 set. 2022.

DÍAZ-GONZÁLEZ, Francisco *et al.* Energy management of flywheel-based energy storage device for wind power smoothing. **Applied Energy**, v. 110, p. 207-219, out. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.029>. Acesso em: 22 ago. 2021.

DOETSCH, Christian *et al.* Electrical energy storage from 100 kW-state of the art technologies, realisations, fields of use. *In*: INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY STORAGE CONFERENCE, 2007, Bonn. **Anais [...]**. Alemanha: Fraunhofer, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260338465_Electrical_energy_storage_from_100_kW--state_of_the_art_technologies_realisations_fields_of_use. Acesso em: 22 ago. 2021.

DUVAL, H. Computer model of the lead/acid starter battery in automobiles. **Journal of Power Sources**, v. 53, n. 2, p. 351-357, fev. 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(94\)02000-s](https://doi.org/10.1016/0378-7753(94)02000-s). Acesso em: 25 jan. 2020.

GUO, Shen. **The application of genetic algorithms to parameter estimation in lead-acid battery equivalent circuit models**. 2010. Dissertação (Master of Philosophy) - University of Birmingham, Birmingham, 2010. Disponível em: https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/956/2/Guo_Mphil_10.pdf. Acesso em: 25 jan. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology roadmap - energy storage, 2014**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-energy-storage>. Acesso em: 24 mar. 2022.

INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. **The world's water battery: pumped hydropower storage and the clean energy transition, 2018.** Disponível em: <https://www.hydropower.org/publications/the-world-e2-80-99s-water-battery-pumped-hydropower-storage-and-the-clean-energy-transition>. Acesso em: 16 fev. 2022.

JACKEY, Robyn A. A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection. *In: SAE WORLD CONGRESS & EXHIBITION*, 400., 2007, Warrendale. **Anais** [...]. United States: SAE International, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2007-01-0778>. Acesso em: 11 set. 2022.

JOSÉ FILHO, Gustavo. **Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM.** 2017. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26342>. Acesso em: 5 set. 2021.

KIM, Taesic; QIAO, Wei. A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 26, n. 4, p. 1172-1180, dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tec.2011.2167014>. Acesso em: 26 nov. 2020.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. (ed.). **Handbook of batteries.** [S. l.]: McGraw-Hill Professional, 2002. 1454 p.

LUO, Xing *et al.* Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, v. 137, p. 511-536, jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>. Acesso em: 21 abr. 2022.

MATLAB. **Fmincon.** [202-?]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>. Acesso em: 24 ago. 2022.

MATLAB. **How the genetic algorithm works.** [202-?]. Disponível em: <https://la.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html>. Acesso em: 22 set. 2021.

MATLAB. **Simulated annealing.** [202-?]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/discovery/simulated-annealing.html>. Acesso em: 26 ago. 2021.

MONTEIRO, Felipe Markson dos Santos. **Planejamento de alocação e atuação de sistemas de armazenamento de energia a baterias para a melhoria do perfil de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-06052019-142158>. Acesso em: 03 ago. 2022.

MULCAHY, T. M. *et al.* Test results of 2-kWh flywheel using passive PM and HTS bearings. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 11, n. 1, p. 1729-1732, mar. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/77.920117>. Acesso em: 25 jan. 2021.

NASCIMENTO, Bruno Bueno Ipaves. **Investigação teórica de nanoestruturas do tipo grafeno para aplicação em baterias de íons de lítio**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-22052018-154906/>. Acesso em: 23 ago. 2021.

NATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. **Challenges and opportunities for new pumped storage development, 2017**. Disponível em: https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2017/08/NHA_PumpedStorage_071212b1.pdf. Acesso em: 16 ago. 2022.

OGAWA, Vanessa Gomes Cruz. **Proposta de identificação dos parâmetros do modelo de bateria para uso na modelagem de sistemas de partida de veículos automotivos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-10082011-140644/>. Acesso em: 3 set. 2022.

OLIVEIRA, Marcelo Manoel de. **Estimativa do estado de carga de baterias em robôs móveis autônomos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-27072016-133537/>. Acesso em: 03 jan. 2021.

PATRÍCIO, Vítor Hugo Machado. **Modelização de um mecanismo de levitação supercondutor para um sistema de volante de inércia comercial**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/1192>. Acesso em: 03 jan. 2021.

RAVISHANKAR, Rao; VRUDHULA, S.; RAKHMATOV, D. N. Battery modeling for energy-aware system design. **Computer**, v. 36, n. 12, p. 77-87, dez. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/mc.2003.1250886>. Acesso em: 03 set. 2022.

RODRÍGUEZ, Daniel Rodríguez. **Sistema de respaldo eléctrico residencial**. 2012. Licenciatura (Engenharia Elétrica) - Universidade da Costa Rica, Costa Rica, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/303289586> Sistema de respaldo electrico residencial. Acesso em: 03 set. 2022.

SALAMEH, Z. M.; CASACCA, M. A.; LYNCH, W. A. A mathematical model for lead-acid batteries. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 7, n. 1, p. 93-98, mar. 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/60.124547>. Acesso em: 25 jan. 2020.

SCHIFFER, Julia *et al.* Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. **Journal of**

Power Sources, v. 168, n. 1, p. 66-78, maio 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.11.092>. Acesso em: 02 ago. 2021.

SERRA, Eduardo T; Orlando, Alcir de Faro; Mossé, Acher; Martins, Nelson. **Armazenamento de energia**: situação atual, perspectivas e recomendações, 2016. Disponível em: <https://energiasroraima.com.br/armazenamento-de-energia-situacao-atual-perspectivas-e-recomendacoes/>. Acesso em: 22 ago. 2019.

SILVA, André Carvalho da. **Utilização de sistemas de armazenamento de energia para melhoria das condições de estabilidade de redes isoladas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de engenharia da universidade do Porto, Porto, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/79557>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SILVA, Pablo Luiz Tabosa da. **Sistema de armazenamento de energia utilizando bateria com aplicação para suavização de potência**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33058>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SILVA, Yáscara F. F. Costa; BORTONI, Edson C. Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: características, oportunidades e barreiras. **Revista Brasileira de Energia**, v. 22, n. 1, p. 48-73, 2016.

SOUSA, José Renato de Brito; LIMA, Antônio Marcus Nogueira. Modelagem e simulação do tempo de vida de bancos de baterias chumbo-ácido utilizados em sistemas de múltiplas fontes de energia. *In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA*, 2008. **Anais [...]**. Juiz de Fora: CBA, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/234028816_Modelagem_e_Simulacao_do_Tempo_de_Vida_de_Bancos_de_Baterias_Chumbo-acido_Utilizados_em_Sistemas_de_Multiplas_Fontes_de_Energia. Acesso em: 22 ago. 2020.

SISTEMAS E TECNOLOGIA APLICADA. **Formatos de baterias NiCd**, 2022. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-nicd/formatos-de-baterias>. Acesso em: 14 set. 2021.

SUCCAR, Samir; DENKENBERGER, David C.; WILLIAMS, Robert H. Optimization of specific rating for wind turbine arrays coupled to compressed air energy storage. **Applied Energy**, v. 96, p. 222-234, ago. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.028>. Acesso em: 22 ago. 2020.

SUCCAR, Samir; WILLIAMS, Robert H. **Compressed air energy storage**: theory, resources, and applications for wind power, 2008. Disponível em: https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2016/10/SuccarWilliams_PEI_CAES_2008April8.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.

WANG, C. Y.; GU, W. B.; LIAW, B. Y. Micro-Macroscopic coupled modeling of batteries and fuel cells: i. model development. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 145, n. 10, p. 3407-3417, 1 out. 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1149/1.1838820>. Acesso em: 02 ago. 2021.

XIAO, Bingjun; SHI, Yiyu; HE, Lei. A universal state-of-charge algorithm for batteries. *In*: DESIGN AUTOMATION CONFERENCE, 47, 2010. **Anais [...]**. New York: ACM Press, 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5523225>. Acesso em: 22 ago. 2020.

XU, Bo *et al.* Recent progress in cathode materials research for advanced lithium ion batteries. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 73, n. 5-6, p. 51-65, maio 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2012.05.003>. Acesso em: 02 set. 2021.