

Universidade Federal de Minas Gerais
Programa Mestrado Profissional
Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual

**Modelagem e caracterização de células de Lítio de
um *pack* de baterias para veículo fora-de-estrada
em transporte de cargas na mineração: uma
abordagem na equalização das cargas na célula**

Tamires Berno Nunes de Oliveira

**Belo Horizonte
2022**

Tamires Berno Nunes de Oliveira

Modelagem e caracterização de células de Lítio de um *pack* de baterias para veículo fora-de-estrada em transporte de cargas na mineração: uma abordagem na equalização das cargas na célula

Versão Final

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito-parcial à obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual.

Orientador: Bruno Gonçalves

Coorientador: Igor Amariz Pires

Belo Horizonte

2022

043

Oliveira, Tamires Berno Nunes de.

Modelagem e caracterização de células de Lítio de um pack de baterias para veículo fora-de-estrada em transporte de cargas na mineração: uma abordagem na equalização das cargas na célula [manuscrito] / Tamires Berno Nunes de Oliveira. – 2022.

85 f.: il. ; 29,5 cm.

Orientador: Bruno Gonçalves. Coorientador: Igor Amariz Pires.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual.

1. Inovação tecnológica. 2. Veículo elétrico. 3. Veículos Off-Road. 4. baterias. 5. Lítio. I. Gonçalves, Bruno. II. Pires, Igor Amariz. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. IV. Título.

CDU: 608.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E PROPRIEDADE INTELECTUAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

“Modelagem e caracterização de células Li-Ion de um pack de baterias para veículo fora-de-estrada em transporte de cargas na mineração: uma abordagem na equalização das cargas na célula”

TAMIRES BERNO NUNES DE OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 31 de agosto de 2022, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes membros.

Prof. Dr. Eduardo de Campos Valadares
ICEx/UFMG

Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia
Escola de Engenharia/UFMG

Prof. Dr. Igor Amariz Pires - Coorientador
Escola de Engenharia/UFMG

Prof. Dr. Bruno Gonçalves – Orientador
IF SUDESTE MG

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Gonçalves, Usuário Externo**, em 05/09/2022, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thales Alexandre Carvalho Maia, Professor do Magistério Superior**, em 21/09/2022, às 14:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Amariz Pires, Professor do Magistério Superior**, em 21/09/2022, às 14:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Campos Valadares, Coordenador(a)**, em 21/09/2022, às 18:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1731041** e o código CRC **22988F99**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E PROPRIEDADE INTELECTUAL

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 162 DE TAMIRES BERNO NUNES DE OLIVEIRA

Às 16:00 horas do dia 31 de agosto de 2022, em ambiente virtual, realizou-se a sessão pública para a defesa da Dissertação de TAMIRES BERNO NUNES DE OLIVEIRA. A presidência da sessão coube ao Prof. Dr. Bruno Gonçalves, IF SUDESTE MG – Orientador. Inicialmente o Presidente fez a apresentação da Comissão Examinadora assim constituída: Prof. Dr. Eduardo de Campos Valadares, ICEx/UFMG; Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia, Escola de Engenharia/UFMG; Prof. Dr. Ruben Dario Sinisterra Millán, ICEx/UFMG - Suplente; Prof. Dr. Igor Amariz Pires, Escola de Engenharia/UFMG – Coorientador; e Prof. Dr. Bruno Gonçalves, IF SUDESTE MG – Orientador. Em seguida, a candidata fez a apresentação do trabalho que constitui sua Dissertação de Mestrado, intitulada “Modelagem e caracterização de células Li-Ion de um pack de baterias para veículo fora-de-estrada em transporte de cargas na mineração: uma abordagem na equalização das cargas na célula”. Seguiu-se a arguição pelos examinadores e, logo após, a Comissão reuniu-se, sem a presença da candidata e do público e decidiu considerar aprovada a Dissertação de Mestrado. O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo Presidente da comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ata que, depois de lida, se aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 31 de agosto de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Gonçalves, Usuário Externo**, em 05/09/2022, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thales Alexandre Carvalho Maia, Professor do Magistério Superior**, em 21/09/2022, às 14:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Amariz Pires, Professor do Magistério Superior**, em 21/09/2022, às 14:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Campos Valadares, Coordenador(a)**, em 21/09/2022, às 18:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1731008** e o código CRC **3FCC5B50**.

Agradecimentos

Agradeço antes de tudo à minha família e amigos de vida, por sempre apoiarem incondicionalmente minhas iniciativas que muitas vezes não se encaixam no status quo.

Gratidão aos meus orientadores Prof. Dr. Bruno Gonçalves e Prof. Dr. Igor Amariz Pires, que dedicarem horas de trabalho e parceria com muita paciência e eficácia ao desenvolverem e contemplarem comigo ideias diversas e serem críticos honestos e apoiadores nas implementações deste trabalho.

Agradeço a todos os admiráveis professores da iniciativa do Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual, em especial ao Prof. Dr. Eduardo Valadares pela apresentação ao programa e primeira recepção na UFMG, à Profa. Dr. Maria Esperanza pelo incentivo e ao prof. Ruben Sinesterra pela recepção e conexão de parceria com o Laboratório de Inovação Tecnológica do If Sudeste MG - JF.

Gratidão aos amigos do Laboratório de Inovação Tecnológica do IF Sudeste MG - JF, meu mais sincero obrigado por todo o apoio e incentivo, e gratidão imensurável aos meus colegas de trabalho e profissão na empresa U&M Mineração e Construção e no parceiro Atlas Power, que me apoiaram, auxiliaram e desenvolveram comigo este projeto durante o tempo que pude atuar na empresa.

Resumo

Este estudo visa primeiramente a modelagem do sistema armazenador de baterias para um caminhão fora-de-estrada modificado e adaptado para propulsão elétrica, cuja demanda energética é de aproximadamente 2MWh e 290 toneladas de carga útil. A construção do módulo de baterias é imprescindível para viabilizar a implementação do pacote energético no veículo real com as devidas adaptações antes de sua plena operação em áreas de mineração no Brasil para transporte de cargas pesadas. Parte deste desenvolvimento contempla o projeto de eletrificação de caminhões fora-de-estrada do setor de inovação tecnológica da empresa U&M Mineração e Construção S.A, com sede em Matias Barbosa (MG).

Outra abordagem do trabalho envolve a caracterização da curva de tensão das células de fosfato de ferro lítio (LFP) de 40Ah e 3,2V, utilizadas na construção do *pack* de baterias implementado no sistema de propulsão do caminhão, de forma a obter os parâmetros da equação que rege o modelo experimental a partir de metodologias aplicadas à amostra de dados de tensão da célula em recarga durante a operação que levam em consideração o modelo elétrico resistor-capacitor simples.

A expectativa é a partir da aquisição e tratamento dos dados característicos de uma célula real obter parâmetros validados para a análise do desequilíbrio de cargas no módulo de 160 células e 102,4V de tensão, principalmente durante a recarga, o que representa um problema no setor e contexto de veículos elétricos. Por fim, estima-se e orienta-se uma futura abordagem que contempla o dimensionamento do sistema de gerenciamento de cargas aplicável ao modelo de forma mais simples, de baixo custo e de igual performance ao sistema de energia aplicável ao caminhão elétrico fora-de-estrada.

Palavras-chave: Baterias, caracterização, célula, modelagem

Abstract

First of all, this study aims to modeling the battery storage system for an off-road truck modified and adapted for electric propulsion, whose energy demand is approximately 2MWh and 290 tons of *payload*. The construction of the battery module is essential to enable the implementation of the energy package in the real vehicle with adaptations and needs before its full operation in mining areas in Brazil for the transport of heavy loads. Part of this development includes the electrification project for off-road trucks inside the technological and innovation sector of the company U&M Mineração e Construção S.A, based in Matias Barbosa (MG) - Brazil.

Another approach of focus and methods of work involves the characterization of the voltage curve for the lithium iron phosphate (LFP) cells of 40Ah and 3.2V, used in the construction of the *pack* of batteries implemented in the truck's propulsion system, in order to obtain the parameters of the equation that governs the experimental model from methodologies applied to the voltage data sample of the cell being recharged during operation that take into account the simple resistor-capacitor electrical model or equivalent model.

The expectation is, from the acquisition and treatment of the characteristic data of a real cell, to obtain validated parameters for the analysis of the load imbalance in the module of 160 cells and 102.4V of voltage, mainly during the recharge, which represents a problem in the electric vehicle sector and context. Finally, it is estimated and proposed a future approach that includes the design of the load management system applicable to the model in a simpler, low-cost way and with the same performance as the energy system applicable to the off-road electric truck.

Keywords: Modeling, Battery, Truck, Cell

Lista de Figuras

1.1	Modelo de Caminhão Fora de Estrada Komatsu 730E. Fonte: Acervo pessoal do autor.	17
1.2	Configuração Híbrido Paralelo Eletrodiese	18
1.3	Configuração Híbrido Série Eletrodiese	18
1.4	Modelo Porsche P1 Elétrico	20
1.5	Análise do poço de extração até a roda do veículo	22
1.6	Diagrama de blocos do sistema de propulsão elétrico de um caminhão fora de estrada	24
1.7	Sistema de Potência dos Caminhões Fora de Estrada Eletrificados. Fonte: Elaboração do Autor.	25
1.8	Automóvel Prius PHEV após incêndio no pacote de baterias de Li-Ion .	30
1.9	Energia específica típica de baterias à base de chumbo, níquel e lítio. .	31
1.10	Esquemático de funcionamento do processo eletroquímico que ocorre no interior da célula de íon de lítio	33
2.1	Desequilíbrio de carga entre as células da bateria	36
2.2	A taxonomia do balanceamento nas células de bateria	37
2.3	Sistema construído para o teste de recarga das baterias e coleta de dados de tensão nas células. Fonte: Acervo pessoal do autor.	41
3.1	Fluxograma da Metodologia Utilizada. Fonte: Elaboração do Autor. . .	44
3.2	Representação do circuito RC de primeira ordem.	45
3.3	Representação do circuito de carga do capacitor. Fonte:Acervo pessoal do autor.	45
3.4	Circuito de carga de um capacitor antes e depois do fechamento da chave S.	46

LISTA DE FIGURAS

4.1	Especificações da célula de lítio utilizada. Fonte: Arquivos do autor.	50
4.2	Célula de bateria utilizada para compor o módulo e <i>pack</i> . Fonte: Acervo pessoal do autor.	51
4.3	Design do módulo composto pelas 160 células de bateria. Fonte: Acervo pessoal do autor.	51
4.4	Dados de tensões por cada segundo de carregamento das 16 células em série do módulo de baterias. Fonte: Acervo pessoal do autor.	52
4.5	Modelagem primária com coeficientes obtidos e ruído experimental. Fonte: Acervo pessoal do autor.	54
4.6	Aplicação de média móvel para obtenção de parâmetros de acordo com dados experimentais. Fonte: Acervo pessoal do autor.	55
4.7	Caracterização da curva de recarga da célula de lítio em teste experimental. Fonte: Acervo pessoal do autor.	56
4.8	Linha de tendência, parâmetros e R quadrado obtidos da curva característica da célula em recarga. Fonte: Acervo pessoal do autor.	56
4.9	Regressão Linear da Amostra $V \times T$ com Filtro Polinomial e Média Móvel. Fonte: Acervo pessoal do autor.	57
4.10	Regressão Linear e Linha de Tendência com $\text{LOG}(V(t) - V_0)$. Fonte: Acervo pessoal do autor.	58
4.11	Hipótese de divisão da curva de recarga da célula em regiões distintas. Fonte: Acervo pessoal do autor.	59
4.12	Gráfico tensão V_{11} x tempo t para a célula 1. Fonte: Acervo pessoal do autor.	60
4.13	Equação e parâmetros ótimos encontrados no modelo para a primeira célula. Fonte: Acervo pessoal do autor.	61
4.14	Gráfico tensão V_{11} x tempo t com implemento da análise em <i>Curve Fitting</i> . Fonte: Acervo pessoal do autor.	61
4.15	Gráfico tensão V_{11} x tempo t para cada região definida. Fonte: Acervo pessoal do autor.	62
4.16	Gráficos de tensão em recarga das células (acima) e desvio padrão do processo (abaixo). Fonte: Acervo pessoal do autor.	63

LISTA DE FIGURAS

5.1	Curva característica e coeficientes para a célula 1 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	65
5.2	Curva característica e coeficientes para a célula 2 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	66
5.3	Curva característica e coeficientes para a célula 3 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	66
5.4	Curva característica e coeficientes para a célula 4 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	67
5.5	Curva característica e coeficientes para a célula 5 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	67
5.6	Curva característica e coeficientes para a célula 6 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	68
5.7	Curva característica e coeficientes para a célula 7 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	68
5.8	Curva característica e coeficientes para a célula 8 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	68
5.9	Curva característica e coeficientes para a célula 9 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	69
5.10	Curva característica e coeficientes para a célula 10 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	69
5.11	Curva característica e coeficientes para a célula 11 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	69
5.12	Curva característica e coeficientes para a célula 12 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	70
5.13	Curva característica e coeficientes para a célula 13 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	70
5.14	Curva característica e coeficientes para a célula 14 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	70
5.15	Curva característica e coeficientes para a célula 15 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	71
5.16	Curva característica e coeficientes para a célula 16 na região 3. Fonte: Acervo pessoal do autor.	71

LISTA DE FIGURAS

5.17 Parâmetros obtidos para células de R mais baixo e a de R mais alto.

Fonte: Acervo pessoal do autor. 73

Lista de Tabelas

1.1	Comparativo entre os tipos de química das baterias	28
4.1	Perfil de consumo do caminhão 730E em atuação na mineração. Fonte: Dados do autor.	49
5.1	Valores da constante de tempo "tau" de cada célula na região 3. Fonte: Dados do autor.	72

Lista de Abreviações

BMS Battery Management System

GTO Gate Turn-Off Thyristor

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

VCU Vehicle Control Unit

BEV Battery Electrical Vehicle

RC Resistor-Capacitor

ECM Equivalent Circuit Model

LIB Lithium Ion Battery

LFP Lithium Iron Phosphate

SOC State of Charge

NCA Lithium Nickel Cobalt Aluminum

LMO Lithium Ion Manganese Oxide

LTO Lithium Titanium Oxide

LCO Lithium Cobalt Oxide

Sumário

1	Revisão da Literatura	16
1.1	Introdução	16
1.2	Eletrificação	19
1.3	Sistema de Potência dos Caminhões Fora de Estrada	25
1.4	Controle de Cargas	32
2	Balanceamento de Cargas	35
3	Metodologia	43
4	Análise de Dados	49
5	Resultados e Discussão	65
6	Conclusões	74
6.1	Considerações Finais	74
6.2	Futuras Abordagens	76
	Referências	78

Capítulo 1

Revisão da Literatura

1.1 Introdução

A mineração é um processo dispendioso de altos riscos tanto na atividade em si quanto na incerteza de retorno de capital investido. Porém, um estudo exalta que esta atividade constitui uma das principais atividades no setor industrial nacional e se enquadra em uma atividade de ganhos consideráveis [1], visto a necessidade de utilização de seus produtos em toda base industrial de qualquer sociedade. No contexto urbano os veículos são caracterizados por um ciclo significativamente menor de trabalho e condições de operação mais favoráveis com uma constância maior de uso de energia para suas operações. Exalta-se que para a atividade de mineração é inevitável a utilização de equipamentos adequados a toda a cadeia produtiva, principalmente no que tange ao setor de transportes [2]. Neste campo, as opções mais adotadas são os caminhões fora de estrada, principalmente em minas de grande porte, devido à facilidade de uso nas diversas frentes de lavra entre outras instâncias da mina. Estes veículos são utilizados tanto em minas a céu aberto quanto em locais subterrâneos para transporte de cargas pesadas como areia, metais, resíduos e outros. Algumas das categoriais mais comuns de veículos pesados fora de estrada são apresentadas abaixo:

- a. Máquinas de construção ou movimentação de terras: tratores de esteiras, retro-escavadeiras, escavadeiras, motoniveladoras, pás carregadeiras;

- b. Máquinas agrícolas: colheitadeiras, tratores agrícolas, pulverizadores, dentre outros;
- c. Veículos militares: veículos de esteiras ou pneus para atividades ou logística que envolvem operações militares
- d. Máquinas de transporte material: guindastes, empilhadeiras, caminhões, entre outros.



Figura 1.1: Modelo de Caminhão Fora de Estrada Komatsu 730E.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Para este trabalho o foco consiste no estudo e proposta aplicados à categoria de máquinas de transporte, com enfoque nos caminhões fora de estrada para a mineração (Figura 1.1), cujo a principal função é o carregamento do insumo (minério ou afins) retirado da cova da mina até sua região de estoque. Uma de suas principais vantagens, além da flexibilidade de utilização para amplas cadeias de cargas, é a possibilidade de ciclos ágeis e vida útil de equipamento de médio a longo prazo. Destaca-se a manutenção pesada do veículo e por vezes de longa duração, o que influencia no planejamento produtivo da operação. O objetivo principal no projeto de um caminhão de transporte no setor minerador é o de reduzir o custo de tonelada por material transportado.

O modelo de caminhão fora de estrada eletrodiesel, também conhecido como híbrido, é aplicado às atividades que requerem remoção e movimentação de grande quantidade de material. São veículos constituídos de caçamba articulada para transporte

com alta potência e capacidade de carga. Neste tipo de veículo a tração é caracterizada pela transmissão de potência mecânica até as rodas traseiras. O sistema pode operar em duas geometrias de construção diversas: geometria híbrido série e geometria híbrido paralela. A principal diferença entre as duas refere-se na capacidade do motor de combustão interna de exercer a tração do veículo.

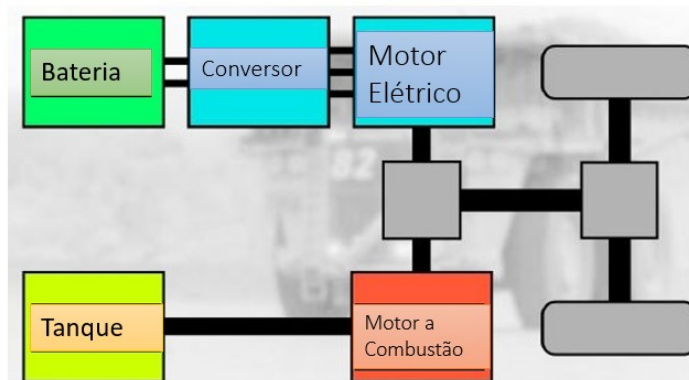


Figura 1.2: Configuração Híbrido Paralelo Eletrodiesel. Fonte: Acervo pessoal do autor.

A configuração "paralela" (Figura 1.2) é aplicada em situações onde a máxima potência do veículo não é exigida a todo o tempo [3]. Já a configuração "série" (Figura 1.3) é normalmente utilizada quando a potência máxima do equipamento é continuamente exigida.

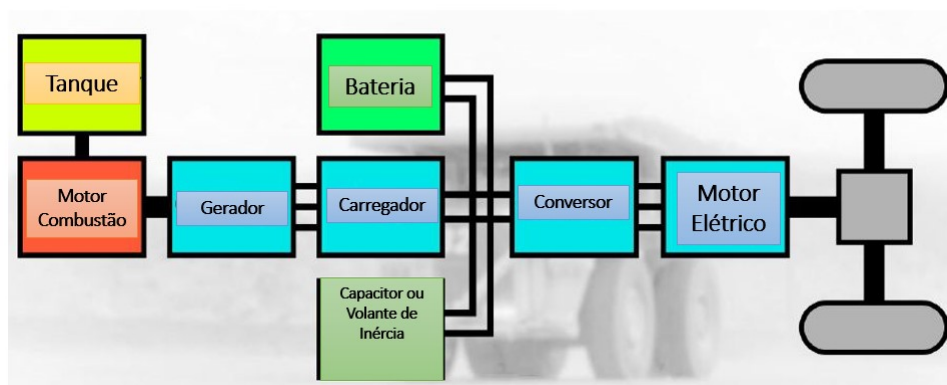


Figura 1.3: Configuração Híbrido Série Eletrodiesel. Fonte: Acervo pessoal do autor.

Como característica das aplicações tecnológicas, são enunciadas vantagens e desvantagens de seus usos. Convencionalmente em uma operação de mina utiliza-se o

caminhão fora de estrada Diesel, principalmente pelo fato da velocidade de operação em aclives, com grande potência e capacidade de transporte (atendendo aos requisitos de produtividade). Porém, é uma escolha que envolve alto custo de combustível. No artigo [4] expõe-se que os caminhões eletrodiesel podem reduzir significativamente este custo na eliminação da conversão mecânica do motor. Em um viés totalmente elétrico, a melhoria na eficiência e a redução no custo é ainda maior [5]. Assim, enxerga-se também a crescente preocupação ambiental e a demanda por tecnologias limpas e eficientes que envolvam a propulsão elétrica com menos emissões de gases.

No caso deste tipo de tecnologia, um trem de força híbrido economiza combustível regenerando a energia do freio com uma máquina elétrica e bateria, desligando o motor quando a energia da bateria é abundante e a demanda de energia é baixa o suficiente para eletricidade pura conseguir acionar a propulsão. Adiciona-se a grande capacidade de armazenar energia cinética como vantagem, embora o estudo apresentado em [6] alega que o controle energético em um caminhão híbrido de transporte para cargas pesadas seja mais restritivo devido à coordenação de ambas as energias cinéticas e elétricas acumuladas.

Atualmente, um dos problemas vigentes para a indústria no setor de inovação e desenvolvimento é a redução de consumo de material para garantir um melhor nível de unificação do produto e simplificar a fabricação e seu reparo. No caso da mineração, o critério mais importante é aumentar a confiabilidade e reduzir o custo de exploração de equipamentos de mineração, principalmente porque trabalham por produtividade hora/máquina. De acordo com a referência em [7] essas tarefas podem ser resolvidas por uma escolha minuciosa de elementos que compõem o design dos caminhões eletrodiesel, bem como minimizar o número de unidades funcionais, combinando as funções de vários elementos.

1.2 Eletrificação

O processo de eletrificação de veículos não é novidade, visto que o veículo elétrico mais antigo é datado entre 1801 e 1850 na Escócia e nos Estados Unidos. Neste período,

como exposto em [8] o inventor Robert Anderson desenvolveu o primeiro protótipo de um calhambeque elétrico e o inventor Thomas Davenport produziu o primeiro motor elétrico que andava sob um trilho de uma pista circular eletrificada. Pontua-se que em 1859 o belga Gaston Plantè expôs a primeira célula da bateria de chumbo-ácido, utilizada nos veículos elétricos e também nos de combustão interna como fonte de energia.

No começo do século XX e até os anos 1990, os veículos elétricos passaram pelo mercado e constituíram 28% do comércio americano, em um período de maior desenvolvimento desta tecnologia. Tiveram certa acensão, compondo até frotas de táxis em Nova York (EUA) em meados de 1900. Em 1903 exalta-se em [9] que na cidade de Londres, na Inglaterra, havia mais veículos elétricos que à combustão.



Figura 1.4: Modelo Porsche P1 Elétrico.
Fonte: [10]

O primeiro carro da fábrica *Porsche*, em 1898, foi um carro elétrico (Figura 1.4) desenvolvido com um motor de potência 2,2kW e atuando a uma velocidade máxima de 35Km/h.

No entanto, a partir dos anos 1905 os veículos elétricos foram amplamente substituídos pelos motores a combustão a partir do petróleo, principalmente com a introdução em 1908 do Ford Modelo T, que revolucionou o mercado automobilístico de transporte particular. Considera-se que algumas das razões eram o alcance do veículo, recarga do sistema e tempo investido neste processo, bem como o custo e disponibilidade do

petróleo (em uma época em que a tecnologia não contava com os avanços atuais, o acesso a energia elétrica era de custo elevado) e a propaganda dos modelos a combustão interna. Desde então, estima-se que em 1935 os carros movidos a motores de combustão interna dominavam o mercado e eram de custo baixo comparado ao que ofereciam. A preocupação com o desenvolvimento dos veículos elétricos foi retomada em meados de 1960, por ser uma solução para os problemas ambientais causados pelas grandes emissões dos veículos à combustão.

Referindo-se ao artigo [11] que exalta a complexidade do processo de eletrificação, apesar de ser necessário. Há uma série de razões do porquê do investimento tanto em veículos elétricos como em híbridos. Os híbridos, que combinam um motor interno a combustão com o motor elétrico, têm o potencial significativo de melhorar a economia de combustível e reduzir as emissões de poluentes sem que reduza a performance da máquina. Esta performance está aliada a uma unidade de controle do veículo, denominada Vehicle Control Unit (VCU), ou Unidade de Controle do Veículo, que coordena as distribuições de energia dentro do sistema. Um estudo expresso em [12] traz que as principais razões para eletrificar um sistema envolvem não só o contexto econômico relacionado ao combustível fóssil (diminuição dos custos), como também o contexto ambiental (maior conforto sonoro, menos emissões, menor gasto de matéria prima), mobilidade e *business marketing* (marketing associado à companhia que adota a política sustentável).

É citado em [13] que o ano de 2010 foi um marco para o desenvolvimento de veículos elétricos pesados, visto que foi um ano em que os preços (\$US/kWh) das baterias de lítio reduziram significativamente enquanto a densidade energética (Wh/kg) praticamente duplicou, ou seja, o investimento nas baterias de lítio se tornou possível e viável para a aplicação em potência dos caminhões. É importante exaltar que o tamanho da bateria em termos de massa e volume influencia diretamente na capacidade de carga do caminhão.

De acordo com a pesquisa realizada em [14] os caminhões de transporte movidos a Diesel são responsáveis por mais de 16% das emissões de CO₂ a nível mundial, sendo o

setor de transportes responsável por 23%. Considerando o contexto de Brasil e América Latina, o artigo [15] reflete sobre as melhores condições mundiais neste contexto para o desenvolvimento de Battery Electrical Vehicle (BEV) devido ao alto nível e potencial de geração de energia elétrica renovável se comparado aos outros países.

No contexto dos primeiros anos de 1900, quando começou-se a explorar o mercado e desenvolvimento do veículo a combustão interna, o petróleo era abundante no mundo e a eletricidade era restrita a alguns locais, responsável por altos custos de construção da rede de distribuição.

Apesar do tema discutido neste trabalho, é pertinente citar também o não interesse neste processo e porque isso ocorre. A eletrificação afeta muitos âmbitos que envolvem grande volume de capital, como a indústria do petróleo, as montadoras de carros convencionais e os fabricantes de velas automotivas, correias dentadas, filtro de ar, óleo lubrificante de motor, escapamentos e muitos outros insumos para esse tipo de máquina a combustão interna. Em uma análise feita em [16] e exposta na Figura 2.2 de *Well to Wheel* (do poço à roda), da Fundação Getúlio Vargas, os veículos a combustão interna são economicamente duas vezes menos eficiente que os movidos à energia elétrica.

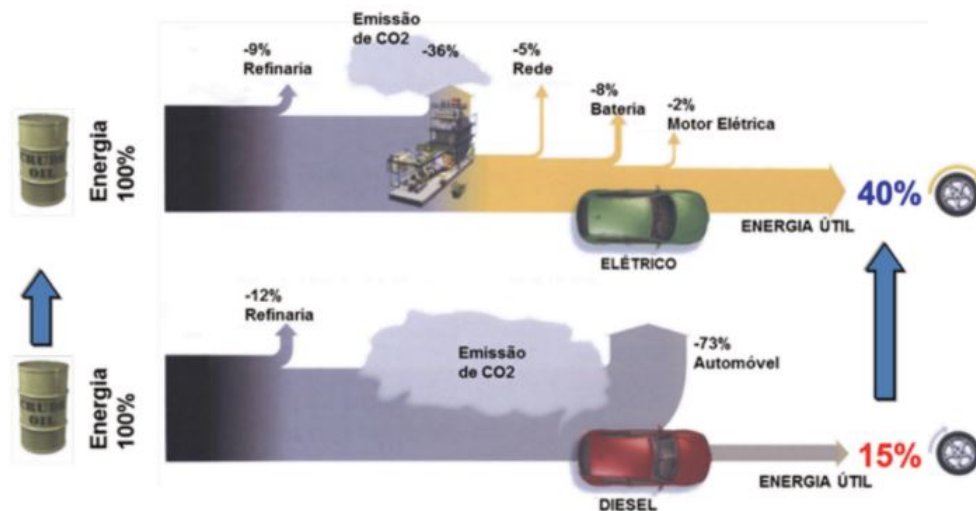


Figura 1.5: Análise do poço de extração até a roda do veículo. Fonte: [16]

No que se refere aos caminhões fora de estrada totalmente elétricos, tem-se em

mente que é uma das aplicações mais desafiadoras dentro dos campos de engenharia de potência e engenharia elétrica, visto o emprego deste tipo de veículo no transporte severo em ambientes de condições adversas que abrangem elevado fator de insegurança, além dos fatores de produção que exigem equipamentos cada vez maiores e com maiores demandas, de acordo com o estudo [17]. Exalta-se que neste contexto é de necessidade o desenvolvimento e aplicação de softwares embarcados para comunicação, sensores de controle, atuadores microcontroladores em uma rede conectada. Destacam-se algumas tecnologias encontradas atualmente no mercado, como visto em [18], que auxiliam no processo de tração. Podem-se citar os tiristores, ou Gate Turn-Off Thyristor (GTO), transistores bipolares, ou Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), entre outros equipamentos.

De acordo com o estudo em [19] nesta aplicação destaca-se a transferência de energia para as rodas traseiras do veículo por meio de um sistema de direção elétrico de corrente contínua, caracterizando-se como uma vantagem sobre o sistema mecânico no que tange à manutenção e aos altos custos de reparo dos sistemas mecânicos de transmissão, pois a eliminação do conversor de torque mecânico, da transmissão mecânica e diferencial constituem uma distinção de valor entre os caminhões elétricos e os demais. Ainda neste tópico, tem-se atualmente na indústria os modelos *AC Drives* em que a corrente alternada é gerada no alternador e em seguida retificada para produzir a tensão contínua de alimentação do barramento do sistema. Essa tensão gerada é filtrada e amplificada nos inversores, que por sua vez alimentam eletricamente o motor e conseqüentemente as rodas do veículo.

Ao tomar-se por base apenas o atual caminhão de transporte de mineração elétrico a Diesel mais comum (elétrico-híbrido), sem o sistema de bateria a bordo, uma pesquisa exibida em [20] mostra que o caminhão de transporte de mineração híbrido série por exemplo pode reduzir o consumo do combustível em 9%, ou economizar cerca de US \$90.090 por ano. O peso adicionado da bateria, em caso de utilização, leva a menor capacidade de carga do caminhão e queda de produtividade de 2,16%, enquanto a mais expressiva economia de custo de combustível equilibra-o para produzir um custo

operacional líquido reduzido de 4,8% (US\$/tonelada). A economia de custo leva cerca de um ano para a recuperação do custo da bateria adicional. Além disso, um viés de desenvolvimento totalmente elétrico compõe um quadro com zero nível de emissões prejudiciais ao meio ambiente, bem como se caracteriza como um sistema de eficiência energética, embora uma máquina totalmente elétrica não garanta grandes níveis de autonomia como as movidas a motor de combustão interna.

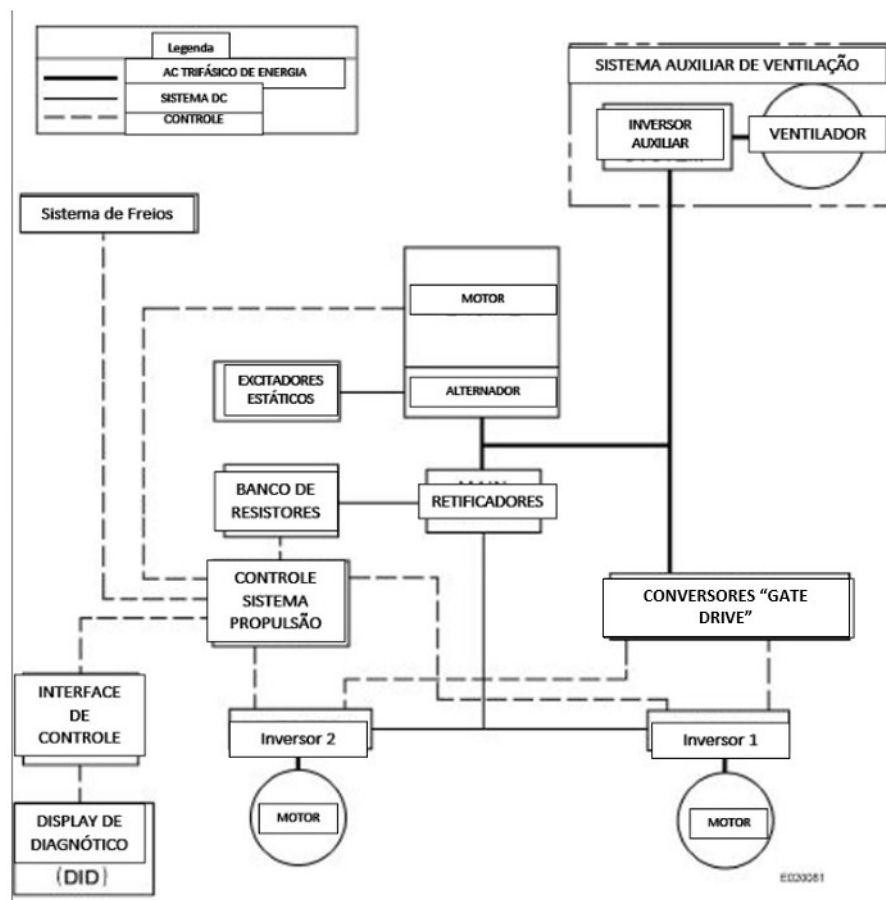


Figura 1.6: Diagrama de blocos do sistema de propulsão elétrico de um caminhão fora de estrada.

Fonte: [21]

A Figura 1.6 apresenta um breve esquemático do funcionamento descrito, de acordo com as instruções em [21]. Ainda sim, é cognoscível a utilização do motor a diesel como forma de alimentação energética para o gerador ou alternador.

1.3 Sistema de Potência dos Caminhões Fora de Estrada

Em caminhões convencionais o sistema de propulsão é alimentado somente pelo motor a combustão interna. Para os caminhões fora de estrada eletrificados o funcionamento da propulsão depende do sistema armazenador de energia e motor elétrico para fornecer a alimentação contínua necessária ao movimento do veículo. A energia elétrica é controlada por um sistema de controle para ser aplicada nos motores elétricos de tração, que acionam as rodas motorizadas para realizar os movimentos de avanço, retrocesso e direção.

É de interesse ressaltar também a presença do sistema regenerador de energia pelos freios, denominado retardo dinâmico. Quando o veículo está freiando, o motor de tração da roda se transforma em gerador (devido à energia de movimento da roda), produzindo energia elétrica controlada pelo sistema de controle. Existe um componente de banco de resistores para que a energia elétrica extra, ou seja, quando não mais utilizada no carregamento do sistema armazenador, seja transformada em calor.

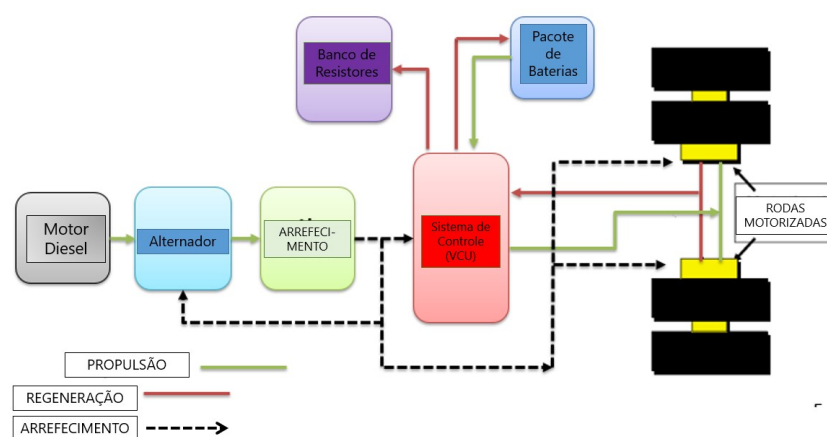


Figura 1.7: Sistema de Potência dos Caminhões Fora de Estrada Eletrificados.
Fonte: Elaboração do Autor.

A Figura 1.7 traz um esquemático de funcionamento do sistema de potência atuante

em um caminhão elétrico. As linhas verdes marcam o fluxo de energia na propulsão do veículo e as linhas vermelhas detalham a energia regenerada. Faz-se a seguir a explanação mais detalhada dos componentes da figura. O sistema armazenador de energia em baterias será explicado mais adiante no trabalho.

Os conversores elétricos deste sistema são conversores de corrente contínua (CC-CC) basicamente formados por circuitos semicondutores de potência que operam como interruptores para controlar o fluxo de potência da entrada para a saída. Nestes sistemas de caminhões fora de estrada elétrico é comum ter-se os tipos de conversores *buck-boost*, ou seja, que podem atuar tanto abaixando a tensão da entrada para a saída como também aumentando esse valor, de acordo com a necessidade e o modo de operação, propulsão ou retardo.

Como citado, em momentos que o sistema armazenador de energia não requer carga, a corrente é direcionada para um banco de resistores, e este banco tem a função de dissipar a energia extra no sistema, tanto na propulsão como na regeneração, principalmente no caso de carga completa do sistema armazenador quando a operação está em modo de retardo dinâmico. Os inversores controlam a energia que é produzida pelos motores geradores da roda e a transformação dessa energia elétrica em energia térmica pelos resistores é controlada por um circuito elétrico de interruptores e contadores.

A presença dos inversores é necessária visto que o motor elétrico da roda motorizada é de funcionamento alternado. Isso significa que a energia que é fornecida pelo sistema armazenador de energia é de corrente contínua, enquanto que para o acionamento das rodas o motor opera em corrente alternada. Os inversores completam um ciclo de acionamento e desacionamento em frequências diferentes para gerar um sinal de energia alternada a partir da fonte contínua. Esse sinal gerado é de tensão e frequência que variam de acordo com as condições de operação do veículo (velocidade demandada, tração, direção e afins).

Quando o sistema se encontra em funcionamento, a propulsão do veículo é acionada, a energia elétrica aplicada ao motor produz a rotação e se conecta às rodas por meio de um sistema redutor. No caso do retardo dinâmico, a energia mecânica produzida

durante o movimento do caminhão é convertida em energia elétrica por meio do motor de tração que atua como gerador de energia. Esta energia produzida atua na recarga do sistema de armazenamento de energia e em caso de sobra é transformada em calor pelo banco de resistores.

Em referência aos sistemas de armazenamento de energia, é de interesse citar os principais encontrados no mercado atual para uso em aplicações de veículos elétricos, principalmente para um embasamento melhor sobre tal utilização e apresentação sucinta das opções encontradas. O Brasil tem um grande potencial para aplicação das energias renováveis como eólica e solar, o que auxilia na distribuição de carga e demanda em um sistema que possivelmente utilizaria grandes frotas de veículos movidos a eletricidade. Porém, alguns dos maiores limitadores do uso de tais fontes renováveis são a eficiência e durabilidade do sistema elétrico armazenador. Atualmente emprega-se em larga escala o uso de armazenadores químicos como baterias, pilhas a combustível e capacitores eletroquímicos.

A respeito destes armazenadores, de acordo com o artigo [22] os capacitores são dispositivos que armazenam energia por meio do acúmulo de cargas elétricas positivas e cargas elétricas negativas. Possuem um sistema de placas condutoras separadas por um material dielétrico, com um ciclo de vida e densidade de potência consideravelmente altos. Um dos fatores de sua lenta introdução nas aplicações para veículos elétricos e híbridos é seu alto custo, principalmente porque para uma capacidade maior a área do material dielétrico também deve ser maior, o que inviabiliza projetos de aplicação veicular. Cita-se também a baixa densidade energética, embora existam aplicações de sistemas armazenadores híbridos que compõem supercapacitores com baterias para prolongar a vida útil de ambos. Os supercapacitores têm o mesmo princípio dos capacitores comuns, mas diferem destes devido ao material que separa as placas condutoras, que neste caso é composto por uma solução eletrolítica e possuem densidade energética mais elevada.

No caso das baterias, que armazenam energia em reagentes químicos que geram cargas, diferem dos capacitores que armazenam a energia diretamente como carga e

possuem uma grande capacidade de armazenamento, embora a densidade energética deles é baixa para se considerar como um grande sistema armazenador. Em termos mais práticos, uma bateria tem densa energia e baixa potência, já um capacitor tem alta potência mas não tem tanta energia. Uma bateria é composta por uma célula eletroquímica, que pode ser conectada em série ou em paralelo com outra de acordo com a tensão e potência requeridas [23].

O sistema armazenador por bateria é popular no mercado devido ao seu custo, praticidade, portabilidade e robustez. É composto por um eletrólito, dois eletrodos (positivo e negativo) e um separador, normalmente poroso e de material isolante. Na aplicação deste trabalho, que aborda eletrificação veicular, as características mais importantes em uma bateria são a vida útil, a energia específica (Wh/kg), a potência específica (W/kg), o custo e a segurança da aplicação no sistema. [24]

Existem dois tipos de baterias, as primárias e as secundárias. As primárias são células não carregáveis, enquanto as secundárias aceitam recarga. [25] Para as aplicações citadas neste trabalho os tipos de baterias e químicas mais comuns são as recarregáveis, com as químicas de lítio ferro fosfato (LFP), de chumbo-ácido, níquel cádmio (NiCd) e de níquel-hidreto metálico (NiMH). A tabela 1.1 demonstra as principais características de cada química em baterias e apresenta um comparativo entre cada uma delas.

Tipo de Bateria	NiCd	NiMH	LFP	Chumbo-Ácido	Alcalina
Tensão Média [V]	1.2	1.2	3.6	2.0	1.5
Energia Específica [Wh/kg]	30..60	50..90	90..115	20..40	20..85
Ciclo de Vida	200..700	300..600	500..1000	200..500	15..25
Temperatura [°C]	-20..50	-20..50	-20..50	-30..60	-30..50

Tabela 1.1: Comparativo entre os tipos de química das baterias.

Fonte: [25]

O ciclo de vida de uma bateria representa o número de ciclos que ela pode ser carregada e descarregada, de acordo com o meio em que se encontra. As condições do meio, como temperatura por exemplo, são fortes balizadores no processo de carga e descarga de uma célula, como também a corrente elétrica envolvida nesses processos.

A densidade energética é dependente da química utilizada.

As células NiCd são de custo mais baixo e mais robustas, de carregamento mais rápido, normalmente atuam em aplicações de eletroportáteis e ferramentas elétricas, embora possuam densidade energética relativamente baixa. As baterias NiMH apresentam uma densidade energética acima das anteriores e são aplicadas em desenvolvimentos com notebooks e aparelhos elétricos e uma desvantagem desse tipo de bateria é seu aquecimento enquanto em processo de carga. O tipo chumbo-ácido é uma tecnologia mais antiga muito utilizada para acionamento de periféricos em veículos, com vantagens como baixo custo e utilização em carga contínua, embora são de densidade energética muito baixa, principalmente ao comparar essa tecnologia com as baterias de lítio.

Para aplicações em veículos elétricos, a melhor densidade energética da bateria de lítio permitiu que ela substituísse outros produtos com outras químicas. Essa tecnologia fornece energia específica muito maior que as químicas de NiCd ou NiMH e chumbo-ácido, sem a qual o desenvolvimento em veículos elétricos modernos seria impraticável. A montagem das células de lítio em módulos e posteriormente em *packs* é o que faz do sistema de hardware desta tecnologia uma relevância para o setor automotivo. Estes *packs* são necessários também para gerenciar a interface de controle eletrônico, ou seja, o cérebro do veículo, e para manter as células da bateria em funcionamento de acordo com os parâmetros normais de segurança e operação da bateria. [26]

Embora a performance das baterias de lítio seja considerável para as aplicações em veículos elétricos [27], há neste tipo de química uma espécie de faixa de operação segura, composta por limites de tensão em que a célula deve ser submetida para que não haja danos à bateria.

Mesmo nos casos de não haver danos mais alarmantes como implicações com fogo, a vida útil da bateria é reduzida ou a célula em específico é danificada com superaquecimento, perfuração do invólucro, esmagamento, sobrecorrente no sistema ou aquecimento indevido do sistema em que está inserida, o que pode provocar incêndio no



Figura 1.8: Automóvel Prius PHEV após incêndio no pacote de baterias de Li-Ion.
Fonte: [27].

próprio sistema e em seus componentes (Figura 1.8).

Atualmente a tecnologia de bateria mais promissora em uso no setor automotivo ainda é a Li-Ion (Lithium Ion Battery (LIB)) [28], pois possui uma das densidades de energia mais altas (100–265Wh/kg ou 250–670Wh/L). Ela fornece até 3,6 V, três vezes mais do que tecnologias como Níquel Cádmio (Ni-Cd) ou Níquel-Metal Hidreto (Ni-MH). A LIB não tem efeito de memória, o que significa que ciclos repetidos de descarga e carga podem fazer com que uma bateria se recorde de uma capacidade menor e sua taxa de autodescarga, de 1,5 a 2% ao mês, seja baixa. Elas são mais fáceis de descartar do que as baterias de níquel-cádmio, pois não liberam cádmio tóxico, por exemplo.

A Figura 1.9 compara a energia específica de sistemas baseados em chumbo, níquel e lítio. Embora o Li-alumínio (Lithium Nickel Cobalt Aluminum (NCA)) seja o vencedor por armazenar mais capacidade do que outros sistemas, isso apenas se aplica a energia específica. Em termos de potência específica e estabilidade térmica, o Li-manganês (Lithium Ion Manganese Oxide (LMO)) e o (Lithium Iron Phosphate (LFP)) são superiores. A química Li-titanato (Lithium Titanium Oxide (LTO)) pode ter baixa capacidade, mas essa química sobrevive à maioria das outras baterias em termos de vida útil e também tem o melhor desempenho em temperaturas mais frias. Destacando-se o trem de força elétrico, a segurança e a vida útil do ciclo da bateria se destacam sobre

a capacidade. Na figura o (Lithium Cobalt Oxide (LCO)) significa Li-cobalto, o Li-ion original. [29]

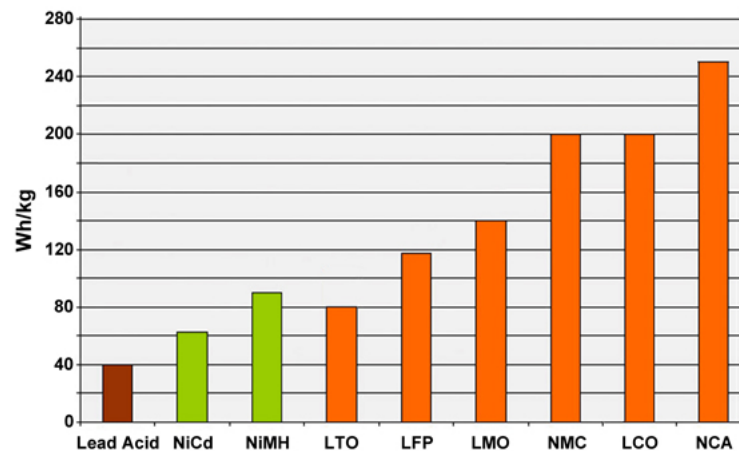


Figura 1.9: Energia específica típica de baterias à base de chumbo, níquel e lítio.
Fonte: [29]

Na bateria de lítio, a tensão nominal da célula, melhor definida como tensão média, depende da combinação química presente em sua composição. Essa tensão nominal é maior que 3V e é detalhada nas especificações de cada fabricante da bateria. Destaca-se que esta tensão é diversa da tensão da célula sob carga, que é variável. Também aplica-se o conceito de capacidade da célula, relacionada à especificação da quantidade de carga que ela suporta, normalmente medida em amperes-hora (Ah) ou miliamperes-hora (mAh), que é a taxa de carga que a célula fornece. Quanto a taxa de carga e descarga, define-se o *C-rate* como a medida relativa da corrente elétrica na célula, ou seja, é a taxa de carga ou descarga de corrente constante que a célula pode sustentar por uma hora. Como exemplo a ser citado, uma célula de 40Ah deve ser capaz de entregar 20A de corrente elétrica por 1h. Este dado também é fornecido pelo fabricante da célula de bateria.

Uma célula única é incapaz de prover energia necessária (em termos de quilowatts) para o funcionamento de um veículo. Um arranjo de células (*string*) é utilizado para formar eletricamente e mecanicamente um bloco de energia conhecido como módulo de bateria. É comum a combinação em série de um módulo para suprir a energia

necessária, ou seja, para que a soma das tensões seja condizente com a demanda da máquina.

1.4 Controle de Cargas

Denominado Battery Management System (BMS), é o sistema que monitora, protege e garante a operação segura do banco de baterias. Dentro de suas principais funções, destaca-se as definidas a seguir:

- Estender a vida útil do banco de baterias
- Monitorar e controlar o processo de carga e descarga
- Garantir que a energia das baterias esteja disponível para a utilização
- Medir e fornecer a temperatura presente na célula
- Proteger a bateria de abusos e danos como sobretensão, sobrecorrente, aquecimento
- Medir e fornecer o estado de carga da bateria, denominado SoC (*State of Charge*)
- Medir e fornecer o estado de saúde da bateria, denominado SoH (*State of Health*)

A premissa para o desenvolvimento de um BMS é garantir o melhor uso da energia dentro da bateria que alimenta o sistema e que o risco de danos causados à bateria seja minimizado. Isto é feito através de monitoramento e controle da carga e descarga da bateria. Este sistema é composto por partes eletrônicas em *hardware* e *software* embarcado. O software é desenvolvido por algoritmos e métodos computacionais para executar as tarefas designadas, de acordo com as funções previamente citadas. As células de baterias compostas por íon de lítio requerem um sistema mínimo de gerenciamento para a garantia de seu funcionamento seguro, visto que um dos maiores riscos desse tipo de química é o superaquecimento e conseqüente dano na célula. [25]

A arquitetura para implementação de um BMS depende da estrutura física da bateria. Em aplicações de alta potência, como é o caso deste projeto, geralmente de

dez a mais de 100 unidades elementares de alta capacidade das células são conectadas em série para aumentar a tensão necessária da bateria. Em geral, a bateria pode ser considerada em três camadas que constituem a célula elementar, o módulo e o pacote (ou seja, a série de módulos). Cada camada pode servir como uma plataforma para a implementação eficaz de um subconjunto do BMS delineado.

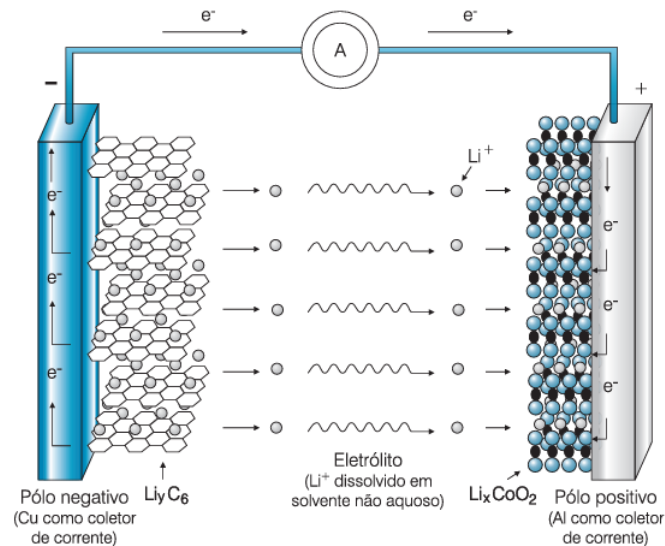


Figura 1.10: Esquemático de funcionamento do processo eletroquímico que ocorre no interior da célula de íon de lítio.

Fonte: [30].

Em respeito ao processo químico de carga e descarga (Figura 1.10), durante a descarga da bateria, que é um processo espontâneo, ocorre a oxidação do carbono presente com a desintercalação dos íons lítio do anodo para o eletrólito. No catodo o cobalto se reduz no próprio óxido, o que permite a intercalação dos íons lítio do eletrólito em sua estrutura. Já no carregamento da bateria, processo não espontâneo, o catodo sofre oxidação com a desintercalação dos íons lítio para o eletrólito e o anodo sofre redução com a intercalação dos íons lítio do eletrólito para o anodo. Para a aplicação em veículos elétricos, os métodos de carregamento de baterias podem ser divididos em métodos condutivos, indutivos e de troca de bateria. Para este projeto considera-se o carregamento condutivo, que refere-se a uma conexão física composta por uma fonte de corrente e cabos de alta tensão, diretamente conectada ao pacote de baterias.

No capítulo 1 deste trabalho aborda-se uma breve revisão da literatura sobre o processo de eletrificação, os motivos para o fomento em iniciativas elétricas, os componentes do sistema de potência de um caminhão fora de estrada, o sistema de armazenamento de energia e o sistema de gerenciamento de carga nas baterias. No capítulo 2 dá-se foco ao sistema de balanceamento de carga em baterias, com a abordagem relevante ao desenvolvimento do trabalho, objetivos, metodologias propostas, definição do sistema de energia e armazenamento e os conceitos sobre o processo de equalização. O capítulo 3 traz a modelagem e caracterização da célula de LFP em testes experimentais de recarga com abrangência em formato de estudo de caso experimental, realizado em ambiente relevante de indústria e condições expostas. No capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos e demonstrada a análise dos processos do capítulo 3. Por fim, no capítulo 5 expõe-se as conclusões obtidas e considerações finais, bem como propostas de continuidade do projeto e futuras abordagens pertinentes.

Capítulo 2

Balanceamento de Cargas

Como estudado em [31], para atingir a tensão e capacidade energética de entrega, as células da bateria devem ser conectadas em paralelo e em série para atender a energia e potência requeridas no sistema. Existe uma inconsistência que é inevitável no caso de baterias conectadas em série devido a fatores de fabricação e uso. Na prática, as células da bateria são diferentes umas das outras, ainda que dentro do mesmo lote de produção. As células de bateria que constituem um módulo ou um *pack* podem não ter as mesmas características devido a diferenças sutis no processo de fabricação e condições de trabalho. A diferença nas características das células resulta em uma diferença nas tensões dessas células, e tende a crescer à medida que o ciclo de carga e descarga se repete. Como células de bateria em uma *string* estão conectados em série, o desempenho desta é limitado ao desempenho da célula mais fraca, e, portanto, a capacidade do conjunto de baterias será reduzida.

Durante a operação normal, a célula mais fraca sofre descarga excessiva e subcarga e, eventualmente, atinge a falha. Enquanto isso, a célula normal pode sofrer sobrecarga porque a operação de carga continua até que a tensão daquela cadeia atinja o valor nominal. Neste caso, a tensão da célula normal pode exceder a carga máxima de tensão e pode causar uma falha precoce devido à degradação acelerada. Portanto, o circuito e processo de balanceamento em células de bateria de lítio é crucial para a longevidade e produtividade das cadeias de baterias ou módulos.

Portanto, segundo o artigo [32], o balanceamento, ou a chamada equalização de

bateria, é considerado como um dos os métodos mais eficazes para reduzir o efeito inconsistente sobre a seqüência de baterias. Destaca-se também que a frenagem regenerativa, utilizada nos caminhões de transporte pesado, pode causar problemas para baterias de íon de lítio visto que o instantâneo pico de corrente de frenagem regenerativa pode fazer com que a tensão na bateria aumente repentinamente sobre o eletrólito.

Entende-se através desta fundamentação [33] a necessidade do sistema de balanceamento de bateria principalmente nas aplicações de baterias de íon de lítio, devido às condições e limitações da composição química da bateria e dos processos envolvidos em carga e descarga . Como exposto sobre baterias de lítio, este tipo possui densidade energética e energia específica consideráveis, operando nas tensões de 3.0V a 4.2V, com taxas menores de auto-descarga e uma maior vida útil (de acordo com o comparativo demonstrado na tabela 1.1), devido ao mecanismo de intercalação mais suavizado nos eletrodos que a compõe.

O balanceamento de um pacote multicelular ajuda a maximizar a capacidade e a vida útil do pacote, trabalhando para manter o estado de carga equivalente de cada célula, na medida do possível, considerando suas diferentes capacidades, na faixa mais ampla possível. É importante destacar que ele ocorre devido à fabricação, a temperatura e o envelhecimento celular. Perfis de tensão e carga desequilibrados podem reduzir o desempenho geral e a durabilidade do armazenamento de energia dos sistemas.

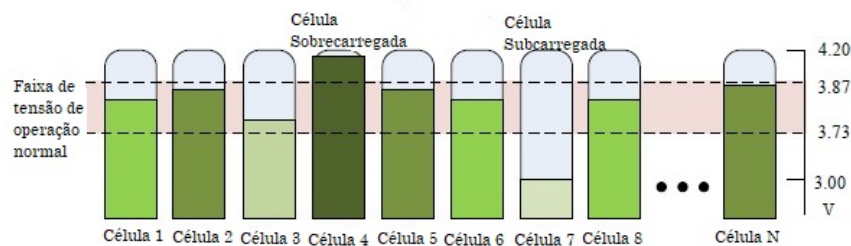


Figura 2.1: Desequilíbrio de carga entre as células da bateria.

Fonte: [34]

De acordo com [35] o balanceamento é necessário para pacotes que contenham mais de uma célula em série (Figura 2.1). As células paralelas irão se equilibrar naturalmente, uma vez que estão diretamente conectadas umas às outras, mas os grupos de células paralelas com fio, conectadas em série (fiação em série paralela) devem ser balanceados entre os grupos de células. Em operação normal, a descarga deve parar quando qualquer célula ficar em tensão mínima pela primeira vez, embora outras células ainda possam manter uma carga significativa. Da mesma forma, o carregamento deve ser interrompido quando qualquer célula atingir sua carga máxima de carregamento seguro. Deixar de fazer isso pode causar danos permanentes às células ou, em casos extremos, pode levar as células à polaridade reversa, causar gases internos, fuga térmica ou outras falhas catastróficas. Se as células não estiverem equilibradas, de modo que o corte alto e baixo estejam pelo menos alinhados com o estado da célula de menor capacidade, a energia que pode ser retirada e devolvida à bateria será limitada.

Discute-se a abordagem de diferentes métodos de balanceamento de cargas em [36]. Citam-se os métodos de balanceamento de células em fim de carga, métodos ativos de balanceamento e métodos passivos de balanceamento. Foca-se nos seguintes tipos de balanceamento: ativo ou não dissipativo, e passivo ou dissipativo.

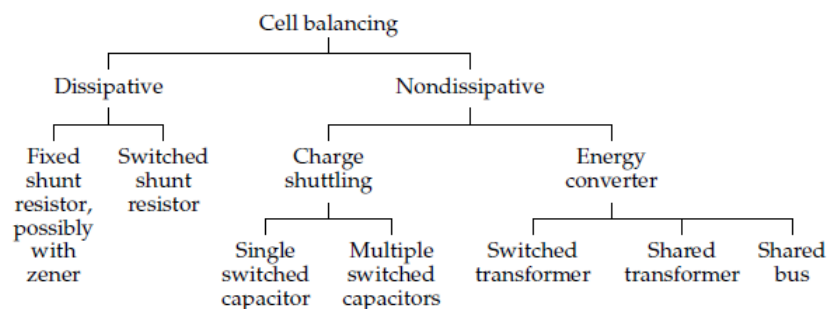


Figura 2.2: A taxonomia do balanceamento nas células de bateria.

Fonte: [37]

De acordo com o estudo em [37], além de ambos os tipos, existem métodos de balanceamento dentro de cada tipo que se diferem de acordo com os componentes utilizados

(Figura 2.2), como resistores *shunt*, transformadores, capacitores *switch*, controladores e afins. Normalmente para o método passivo se utiliza o termo "regulador de bateria", e se utiliza de resistores ou outros componentes eletrônicos para dissipar a carga de determinadas células até balancear a bateria. Já para o balanceamento ativo os conversores CC/CC (conversão de corrente contínua) são utilizados para transferir carga entre as células. Um sistema de gerenciamento completo inclui o equilíbrio da tensão das células, o monitoramento de temperatura e de carga para maximizar a vida útil da bateria.

No caso do balanceamento passivo, a energia é retirada da célula com maior tensão e dissipada em resistores como forma de calor. Esse processo equaliza a carga da bateria em um ponto fixo determinado, geralmente quando as células atingem o máximo de carga. A desvantagem desta utilização é a perda da energia por meio de calor, considerando que o calor residual em excesso pode também influenciar na taxa de equilíbrio de forma a limitá-lo. No processo de balanceamento ativo a energia é retirada da célula com carga total para as células de carga inferior, por meio de processos com componentes como conversores, transistores, chaves e controladores. O malefício deste processo é seu custo envolvido e a complexidade da topologia que em sua maioria é específica a um processo e não aplicável em larga escala.

O balanceamento de baterias é considerado mandatório para o problema de inconsistência de uma série conectado ao sistema de armazenamento de energia da bateria. É de prioridade do projeto, visto que se define o uso de baterias baseadas em lítio, o controle e o balanceamento da carga proporcionada pelo sistema armazenador de baterias, devido a criticidade do sistema do caminhão e conseqüentemente o risco envolvido durante a operação do veículo nos campos de mineração. Nesses locais, observam-se altas temperaturas de trabalho, em alguns ambientes muita incidência de chuvas, outros a operação envolve muita poeira e intempéries diversas. Assim, o sistema de baterias é dimensionado para atender à demanda do caminhão e os devidos testes de carga e descarga deste sistema são feitos com uma interface de software utilizado para verificar o quanto de tensão está presente no sistema, temperatura que a célula alcança em

operação, bem como certificar-se de que a comunicação entre os sistemas está correta.

Esse procedimento é de suma importância visto que qualquer falha (possivelmente acusada na simulação), se não ajustada e uma vez em operação real, poderá ser passada para o sistema de transmissão do caminhão e danificá-lo (ocorrência de sobrecorrente em contadores, switches, choppers, inversores e demais dispositivos), levando à combustão do gerador da roda motorizada devido à sobrecarga neste sistema - responsável pela regeneração energética no retardo -. São realizadas as medições de corrente e tensão providas pelo pacote de baterias e a certificação de que este sistema está suprindo corretamente a demanda energética de um caminhão que oscila entre 1200-1900V no acionamento.

As etapas para a definição dos sistemas armazenador e equalizador consistem em definir o sistema do veículo a ser utilizado, com as características de demanda energética para o sistema de propulsão. Em seguida define-se qual a operação do equipamento, principalmente para conhecer o quanto de energia é gasta dentro do escopo ou ciclo de trabalho no local. De posse dessas informações, é preciso calcular, simular e conceber o sistema de alimentação e armazenamento de energia, e no caso de baterias a química a ser utilizada, para suprir esta demanda. Então, a partir do sistema de armazenamento utilizado projeta-se o sistema de gerenciamento de carga e descarga para a tecnologia utilizada. Por fim, são aplicados os testes e análises de comportamento do sistema armazenador sob condições de carga e descarga, operando com o controle do sistema de gerenciamento ou BMS.

Primeiramente considera-se o desenvolvimento do banco de baterias que compõe o módulo, a partir da obtenção das informações de demanda energética do caminhão. A partir do sistema de armazenamento desenvolvido, considera-se a obtenção do sistema de gerenciamento de carga e descarga do sistema, para a segurança das operações de carga e descarga não só no que tange à segurança da operação, mas também sobre a saúde das células de lítio, devido à sua criticidade e composição delicada propensa à sobrecargas e sobreaquecimento.

O sistema de gerenciamento de cargas utilizado é composto por componentes ele-

trônicos que fazem o controle das cargas no banco de baterias, de modo a desligar o circuito para evitar a sobrecarga da bateria, como também verifica se as células estão trabalhando na mesma tensão. Frequentemente os sistemas de gerenciamento também monitoram a temperatura e fazem o desligamento do circuito em condições perigosas. Definiu-se a estratégia de gerenciamento de cargas descentralizada devido à tensão elevada, ou seja, uma placa eletrônica principal comunica com outras pequenas placas de aquisição de dados.

A partir da definição do sistema de armazenamento e gerenciamento, observou-se a necessidade dos testes de carga e descarga do banco de baterias utilizado no projeto (102,4V, 200Ah). Nesta etapa setou-se o circuito elétrico de recarga e foram dimensionados os equipamentos a serem utilizados, como o contator de alta tensão, a fonte de corrente (no caso do teste de recarga), o número de módulos, o cabos de alta tensão, o diodo de potência para retenção da corrente e proteção da fonte de recarga e o próprio sistema de gerenciamento.

Visto que a fonte de corrente era limitada aos 60V de tensão, a recarga dos módulos foi realizada na *string* de 16 células em série por vez, para limitar a tensão em 51,2V no conjunto de carga. Para a coleta dos dados de tensões em tempo real da célula, utilizou-se um sistema de gerenciamento de baterias com leitura de tensão de cada uma das 16 células em série do módulo.

Para obtenção dos dados de carga e descarga do módulo de baterias foi necessário haver alguns testes de estresse das células, principalmente para a correta medição do desbalanceamento entre as células do módulo no que tange aos valores de tensão. Construiu-se um sistema teste (Figura 2.3) para que o carregamento do módulo fosse realizado, composto por uma fonte de corrente de 240A e 60V, um sistema de gerenciamento de carga BMS, um diodo para impedir o retorno da corrente elétrica para a fonte, uma chave contatora de segurança e o próprio banco de baterias constituído pelo módulo de 102,40V e 200A, ou seja, configurado em 32S5P com 32 células em série conectadas ao bloco de 5 ligadas eletricamente em paralelo.

Previamente ao início de recarga do módulo, observou-se pelos dados de tensão

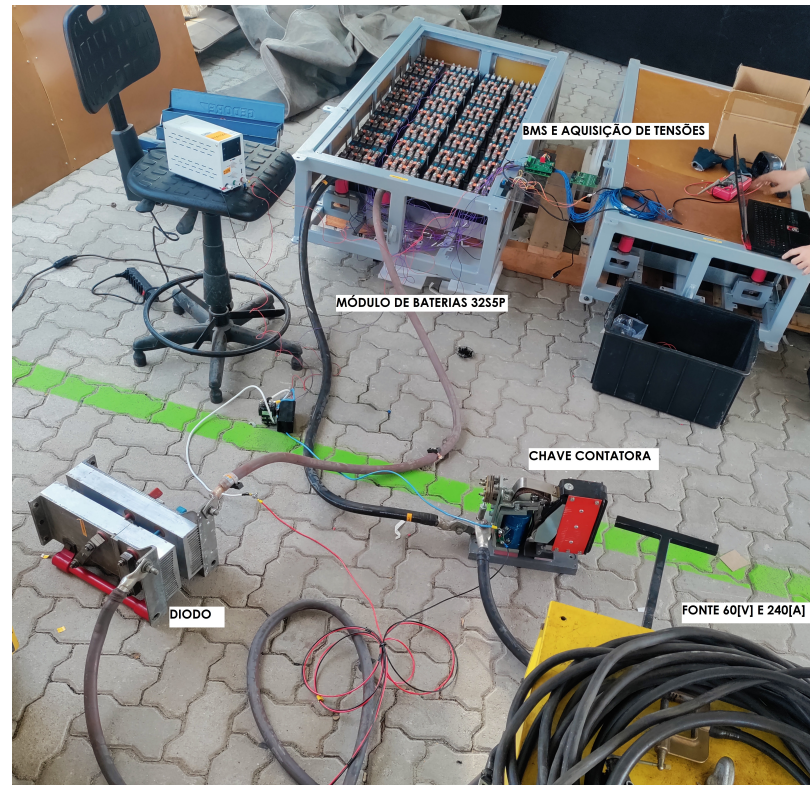


Figura 2.3: Sistema construído para o teste de recarga das baterias e coleta de dados de tensão nas células.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

o desbalanceamento entre as células, com a medição de tensão em tempo real pelo sistema de gerenciamento e monitoramento. Foi observado que algumas células apresentavam tensão em 3.27V e outras em 3.38V, configurando em torno de 110mV de desbalanceamento entre a maior célula e a menor do módulo. Ressalta-se que apenas o sistema de gerenciamento, apesar de o BMS utilizado possuir metodologia interna de balanceamento passivo, não é suficiente para a equalização em tempo hábil de operação, visto que corrente de balanceamento integrado do sistema possui valor em torno de 150mA.

Com o ambiente de teste preparado, realizou-se o teste de recarga do banco, a partir da *string* de 16 células em série (102,40V) e 5 em paralelo (200A) por vez. Um computador conectado ao sistema de gerenciamento de cargas por meio de microcontrolador com transmissor via rede *wifi* foi capaz de expor a leitura e demonstrar os dados em

tempo real, mais detalhadamente, as tensões no módulo durante o carregamento e a temperatura, propriedade esta medida através de sensores estabelecidos nas células dentro do módulo.

A partir dos dados coletados durante o teste e obtidos pela transmissão em modo remoto, e após o corte do circuito de recarga pelo sistema de gerenciamento, foi possível obter um arquivo de leitura das tensões e temperaturas relacionadas à amostra testada, bem como também obteve-se o tempo gasto no processo de recarga. Com esta aquisição as informações foram tratadas via *software* em computador e as metodologias de análise e caracterização da célula de Lítio Ferro-Fosfato foram desenvolvidas, fundamentadas nesta base de dados experimental e demonstradas mais a frente neste trabalho.

Capítulo 3

Metodologia

O foco deste capítulo é apresentar a metodologia de modelagem e caracterização da célula LFP, de fosfato de ferro e lítio, que compõe o sistema de armazenamento em módulo para a alimentação do caminhão de alta potência. Um estudo de caso é apresentado, com um desenvolvimento focado no módulo de baterias para o caminhão modelo 730E da fabricante Komatsu, um projeto real da empresa U&M Mineração e Construção.

Esta é uma metodologia de caracterização da célula de lítio utilizada no banco de energia do caminhão, e o intuito é definir o comportamento e a característica de células de LiFePO_4 a partir de dados experimentais de recarga do módulo de 160 células e 102,4V de tensão modelado para o sistema de propulsão do caminhão elétrico, a fim de propor o sistema de balanceamento de cargas simplificado e de baixo custo através da caracterização da célula.

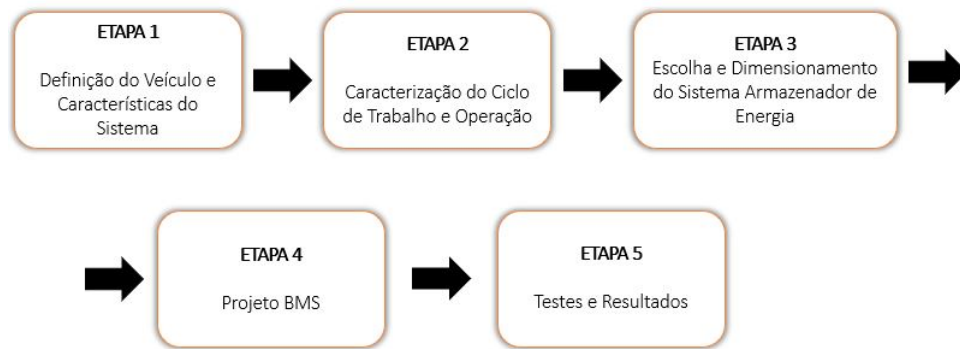


Figura 3.1: Fluxograma da Metodologia Utilizada.

Fonte: Elaboração do Autor.

A tratativa envolve quatro abordagens diversas de modelagem dos dados experimentais. Para caracterizar o comportamento da bateria existem diversos modelos que se diferem entre modelos eletroquímicos e modelos de circuitos equivalentes. Como estudado em [38], a abordagem eletroquímica é responsável pela dinâmica física da bateria em termos de variáveis eletroquímicas, e geralmente um grande número de parâmetros de projeto e cinética eletroquímica são necessários previamente ao estudo, sendo portanto mais utilizado para entender os processos de reação dentro da bateria e para orientar em sua fabricação.

De acordo com a abordagem em [39], o modelo de circuito equivalente, nomeado Equivalent Circuit Model (ECM), utiliza-se de resistências, capacitâncias e fontes de tensão para descrever os processos de carga e descarga, sendo construído no domínio da frequência ou do tempo, em que cada componente tem características físicas definidas, portanto é um modelo melhor definido com expressões matemáticas mais simples, mais intuitivas e mais fáceis de manipular. Os componentes utilizados descrevem a relação entre tensão e corrente demonstradas na operação da bateria.

A Figura 3.2 demonstra um diagrama esquemático de um circuito Resistor-Capacitor (RC) em primeira ordem, em que a tensão V_{oc} denota a tensão de circuito aberto, R_o denota a resistência do eletrólito interno da célula, R_1 representa a resistência de polarização e C_1 é representado pela capacitância. O circuito possui uma corrente re-

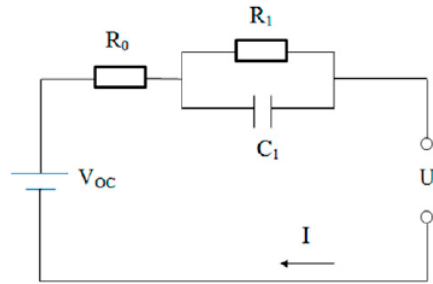


Figura 3.2: Representação do circuito RC de primeira ordem.
Fonte: [40]

presentada por I (de sinal positivo na descarga e negativo na carga) e U que consiste na tensão do terminal da célula de bateria. Utiliza-se deste exemplo de circuito neste trabalho pois a metodologia empregada é de adequação da curva da bateria ao modelo simples e acredita-se que a exemplificação no circuito de primeira ordem é o primeiro passo para tal abordagem simbólica do componente capacitor como representação do armazenador de energia.

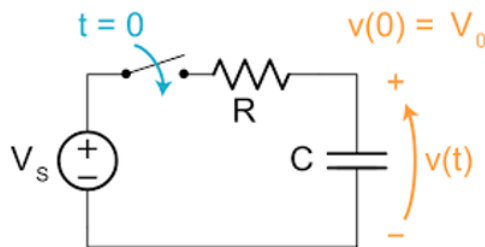


Figura 3.3: Representação do circuito de carga do capacitor.
Fonte:Acervo pessoal do autor.

Primeiramente, supõe-se que a abordagem do experimental pode ser tratada como o circuito RC série simples, com a célula de bateria com comportamento similar ao capacitor em carga (Figura 3.3). Fez-se a suposição matemática do comportamento do sistema em modelo de exponencial negativa e as equações que se seguem foram analisadas e utilizadas no modelo. O intuito da abordagem é analisar o modelo mais realístico possível para o experimental previamente obtido após estudo prévio de outros mo-

delos viáveis como a abordagem por temperatura, introdução de outros componentes como indutores e resistores no modelo com maior complexidade de circuito. Decidiu-se seguir pelo modelo mais simplificado possível que traduza a realidade experimental - modelagem matemática orientada ao circuito experimental com modelo simplificado e similar ao modelo *Shepherd* que descreve o comportamento electroquímico da bateria directamente em termos de tensão e corrente. [41]

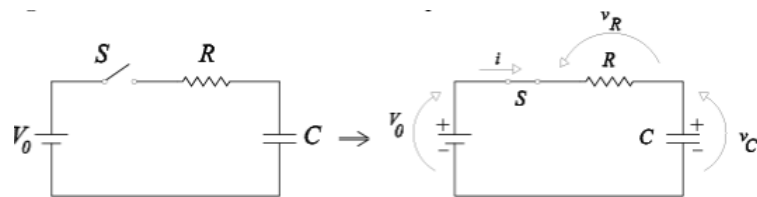


Figura 3.4: Circuito de carga de um capacitor antes e depois do fechamento da chave S.

Fonte: [42]

Em termos de equacionamento matemático, o modelo que rege a caracterização de carga do capacitor (Figura 3.5) é representado por:

$$V_0 = V_R(t) + V_C(t)$$

(1)

Em que $V_C(t)$ e $V_R(t) = RI(t)$. A carga do capacitor é representada por:

$$Q(t) = C * V_C(t) = \int_a^b I dt$$

(2)

Assim, obtém-se:

$$V_0 = \frac{1}{C} * \int_a^b I dt + R * I$$

(3)

Aplicando-se a derivada em relação ao tempo e ao considerar-se que

$$\frac{dV_0}{dt} = 0$$

tem-se:

$$\frac{dI}{I} = -\frac{dt}{\tau}$$

(4)

Onde

$$\tau = R * C$$

que é um parâmetro denominado constante de tempo do circuito RC, denominado "tau". Ao integrar-se (4) definindo-se o instante de 0 a t segundos:

$$\int_0^t \frac{dI}{I} = - \int_{V_0/R}^t \frac{dt}{\tau}$$

(5)

Obtem-se a equação de carga do capacitor caracterizada por:

$$I(t) = \frac{V_0}{R} * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

(6)

Desta análise conclui-se que a corrente de carga diminui de forma exponencial a medida que o capacitor é carregado. Portanto, se a tensão no resistor é descrita como $V_R = R * I(t)$, temos pela equação em (1) que $V_c(t) = V_0 - V_R(t)$. Desta forma, a tensão no resistor e no capacitor são descritas como:

$$VR(t) = V0 * e^{\frac{-t}{\tau}}$$

(7)

$$VC(t) = V0 * (1 - e^{\frac{-t}{\tau}})$$

(8)

Substituindo-se em (1), a equação final é representada por:

$$V0 = V0 * e^{\frac{-t}{\tau}} + V0 * (1 - e^{\frac{-t}{\tau}})$$

(9)

Em linhas gerais, a equação (7) pode ser adequada como $Y = B + A * x$, para melhor visualização dos coeficientes e manipulação matemática de obtenção destes. Baseando-se na modelagem equacional apresentada e com os dados experimentais disponíveis, foi realizado tratamento dos dados experimentais de forma a obter os coeficientes da equação enunciada na análise do circuito RC citada neste trabalho, com a premissa em hipótese de que o coeficiente "tau" ser fator de influência no desbalanceamento das células e definir a diversidade entre as curvas características de cada célula, visto ser uma característica individual.

O capítulo 3 demonstra a análise dos dados obtidos no dimensionamento do sistema de armazenamento energético, como também os resultados prévios adquiridos tanto no tratamento dos dados de teste experimental quanto nas análises destes dados via gráficos e modelagens matemáticas expostas, principalmente para obter a caracterização da curva de recarga da bateria utilizada e demonstrar similaridades entre o dado experimental e o modelo proposto.

Capítulo 4

Análise de Dados

No que tange ao balanceamento de cargas, inicialmente apresenta-se uma arquitetura viável de armazenamento e fornecimento de energia e o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento do sistema de baterias.

Exalta-se que o fomento deste capítulo, que enuncia os resultados do dimensionamento do sistema armazenador e das análises obtidas em testes experimentais, compõe um desenvolvimento do Departamento de Inovação da empresa U&M Mineração e Construção, localizada em Matias Barbosa - MG. A empresa atua no mercado de construção pesada e mineração, com foco em manutenção e desenvolvimento de equipamentos para utilização em movimentação de grandes cargas nestes setores.

Tabela 4.1: Perfil de consumo do caminhão 730E em atuação na mineração.

Fonte: Dados do autor.

Medidas	Valores
Energia Consumida [kWh]	388,41
Energia Gerada [kWh]	175,01
Energia Efetiva [kWh]	213,34
Tensão Máxima [V]	1369
Potência Máxima [kW]	1291,58
Corrente Máxima [A]	1974

De posse do perfil de consumo do caminhão de acordo com testes de atuação em campos de mineração, observou-se a demanda energética de acordo com a tabela 4.1. A partir dos valores apresentados foi modelado o sistema elétrico de fornecimento que

fosse capaz de suprir a tensão requerida para o mínimo funcionamento do sistema.

O alternador utilizado no equipamento é capaz de gerar tensão alternada trifásica de frequência síncrona que atinge valores entre 0 e 1900V após retificada. A potência máxima fornecida por esse alternador é de aproximadamente 1.3MW. O sistema, através de uma chave seletora, também conta com a opção de seleção da velocidade para o modo em operação.

Assim, a velocidade mínima para a operação é de 5.311 km/h (quilômetros por hora), considerada de baixo valor, e para tal velocidade aplicada a tensão requerida é de 1200V [3]. Com as informações de demanda do sistema foi possível modelar e estimar o sistema de elétrico que fornecesse pelo menos o mínimo requerido no caminhão para a menor velocidade de operação, ou seja, o objetivo era o cumprimento de pelo menos 1200V de tensão no sistema.

Dessa forma, definiu-se os requisitos de *pack* desejáveis para fornecer energia ao motor diesel, ao controle do sistema e ao sistema de alta tensão para propulsão do veículo.

No.	Item	Specification
1	Cell Type	Lithium Iron Phosphate Battery
2	Nominal Capacity	40Ah
3	Average Working Voltage	3.2V
4	AC-impedance	$\leq 0.7m\Omega$
5	Weight	1050 \pm 30g
6	Maximum Charge Current	6C(Continuous) 10C (30s)
7	Charging End Voltage	3.65V
8	Maximum Discharge Current	6C(Continuous) 10C (30s)
9	Discharge End Voltage	2.0 V
10	Charge Temperature Range	0~55°C
11	Discharge Temperature Range	- 20~60°C
12	Optimal Operating Temperature Range	
	Charge	15~35°C
	Discharge	15~35°C
13	Storage Temperature	
	1 month	- 40~ - 45°C
	6 months	- 20~ - 35°C

Figura 4.1: Especificações da célula de lítio utilizada.

Fonte: Arquivos do autor.

A Figura 4.1 demonstra as especificações da célula de bateria selecionada para a aplicação.

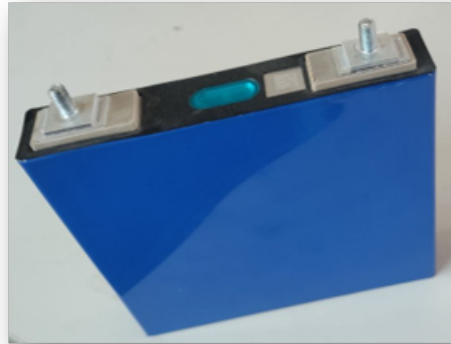


Figura 4.2: Célula de bateria utilizada para compor o módulo e *pack*.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

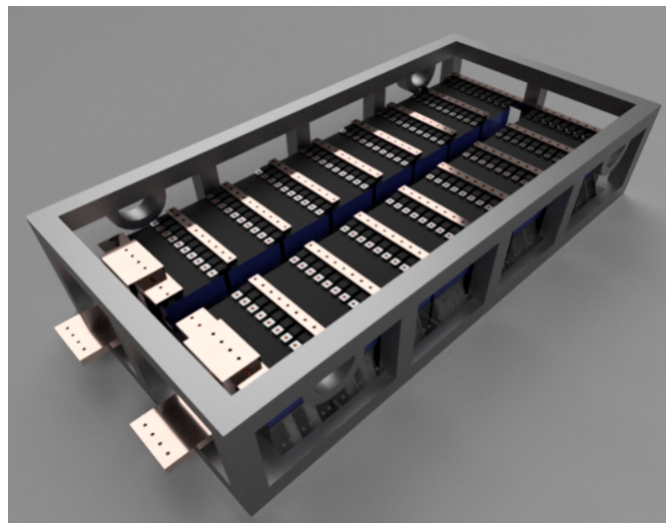


Figura 4.3: Design do módulo composto pelas 160 células de bateria.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

Com as informações da célula (Figura 4.2) e a partir da definição do fornecedor das baterias, foram desenvolvidos o módulo (Figura 4.3) composto pela organização das células para se chegar à tensão e corrente necessárias, bem como o sistema de *pack* para se chegar à potência requerida. A constituição do banco de energia deu-se primeiramente com a composição dos módulos, que foram desenvolvidos com 160 células

cada um e entrega energética de 102,4V de tensão e 200A de corrente, com as células configuradas eletricamente em 32S5P, ou seja, 32 células conectadas eletricamente em série e 5 células em paralelo.

A partir da formação do módulo, para se alcançar a tensão requerida no sistema de 1200V mínimos, construiu-se cada *pack* composto por seis módulos de 102,4V cada conectados eletricamente em série, e dois *packs* ao todo foram desenvolvidos para a obtenção dos 1200V totais.

A divisão em dois *packs* separados foi motivada pela segurança de operação e manuseio de todo o sistema, com menores valores de tensão em cada *pack*, visto a maior facilidade de manipulação, montagem e manutenção em módulos e *packs* separados, além dos fatores de segurança na operação e no manuseio do sistema.

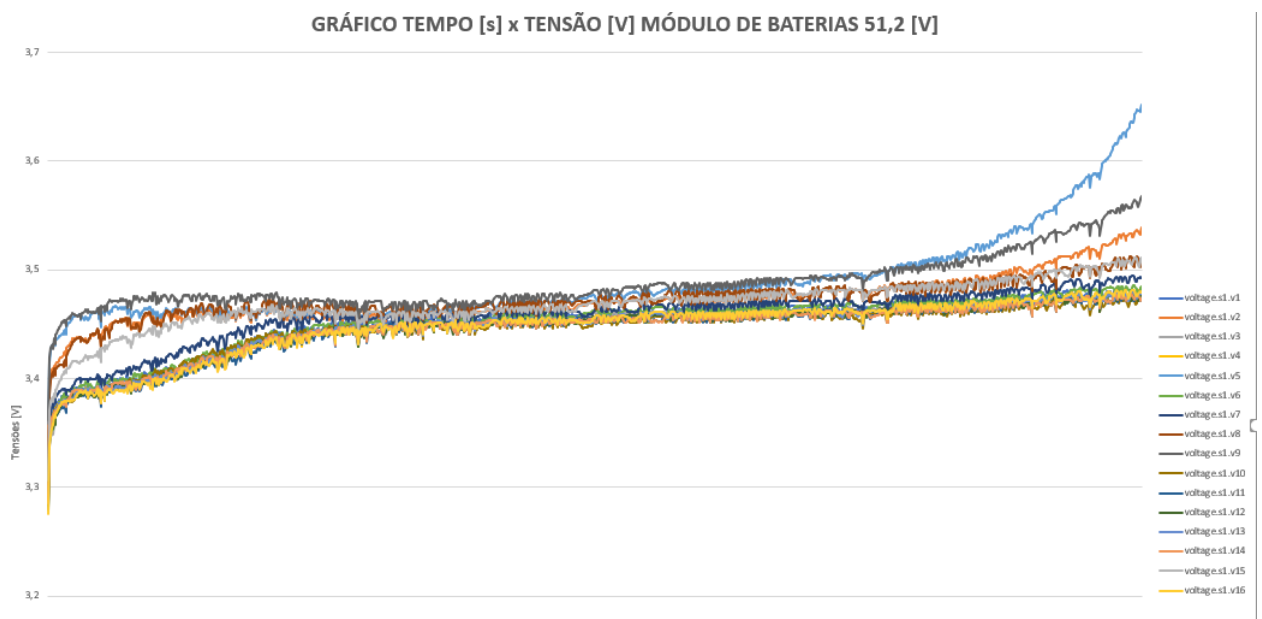


Figura 4.4: Dados de tensões por cada segundo de carregamento das 16 células em série do módulo de baterias.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Desta forma, após o teste de recarga do módulo, coletou-se os dados gerados no processo para que fossem analisados e tratados. O gráfico da Figura 4.4 demonstra os dados das 16 células em série em cada segundo desde o início da recarga até a abertura

da chave contatora e consequente corte de energia do sistema.

De acordo com os dados obtidos a partir dos testes experimentais descritos no capítulo 3, e o tratamento destas informações, destaca-se primeiramente a curva característica da célula Litio Ferro-Fosfato em estado de recarga. Observa-se que nos primeiros minutos de recarga a células estão em desequilíbrio de tensão, porém retrata-se uma equalização das células quando as tensões estão na faixa de 3.40V a 3.46V, quando o sistema novamente entra em um estágio de desequilíbrio. Este levantamento tem o intuito de estudar o motivo do desbalanceamento em estágio inicial e estágio final de recarga, bem como se as propriedades de cada célula são responsáveis pelo diverso comportamento entre elas, como demonstrado no gráfico da Figura 4.4.

A partir do exposto acima, o intuito abordado foi de manipular por diferentes tipos de metodologias os dados experimentais de células deste pack de baterias em estado de recarga, em modelo ECM, para encontrar a equação padrão e gráficos com elemento característico de cada célula, a fim de analisar o comportamento similar e característica diversa das células e posterior ideal dimensionamento do sistema de balanceamento desse sistema.

Levantou-se uma hipótese de comparação dos dados experimentais com os resultados teóricos de manipulação para achar similaridades. Para a modelagem da célula e obtenção de características, o objetivo da análise é guiado pelo dado experimental obtido nos testes e a partir destes dados a modelagem é proposta, de forma a encontrar os parâmetros e coeficientes da equação que melhor se encaixa ao resultado observado no gráfico experimental.

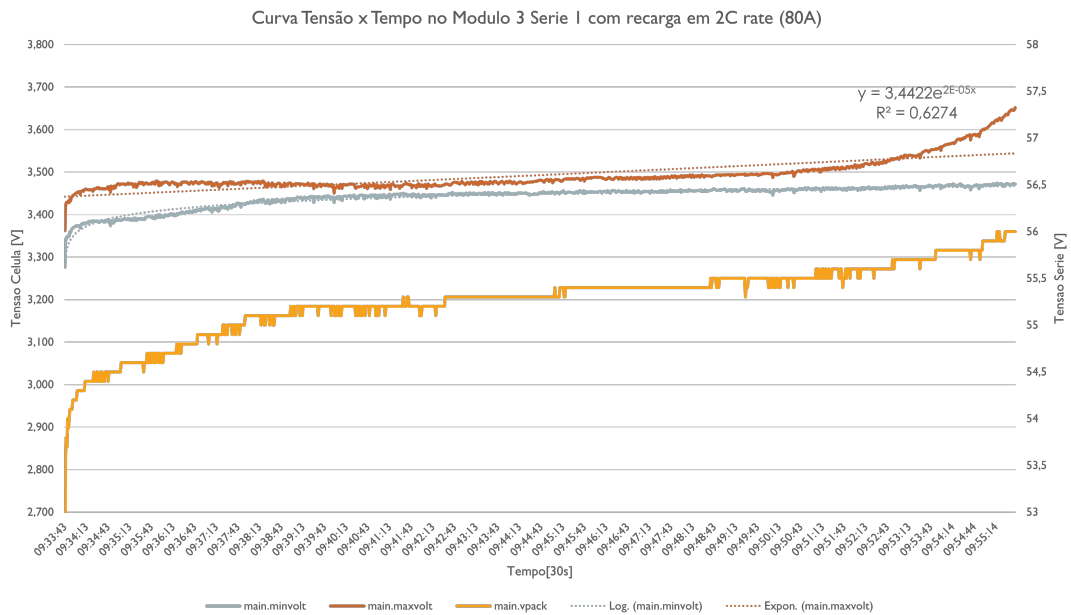


Figura 4.5: Modelagem primária com coeficientes obtidos e ruído experimental.
 Fonte: Acervo pessoal do autor.

A Figura 4.5 demonstra os gráficos obtidos com a manipulação matemática em *software Excel* dos dados relacionados, ainda com ruídos da fase de teste experimental. Destaca-se a análise de regressão pelo coeficiente R quadrado, que é uma medida estatística que varia de 0 a 1 (nível baixo a alto, respectivamente) de quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada e sua utilização é pertinente para um dos critérios de validação do modelo.

Visto que a presença de ruído no experimental é um fator de impacto nos resultados e que corrobora para obtenções incorretas, fez-se o tratamento dos dados de forma a retirar os ruídos presentes, utilizando-se a metodologia de regressão linear. Primeiramente, foi calculada a diferença em valor entre $V(t)$ e V_0 (Caracterizado por $Y(t)$ na Figura 4.6), para que então fosse aplicado em $Y(t)$ o método matemático em logaritmo do valor e a média de cada dez valores (média móvel) fosse obtida, com foco em mitigar os ruídos presentes na amostra dos dados. A partir da amostra tratada plotou-se o gráfico destes dados com o objetivo de encontrar a linha de tendência ótima, para a

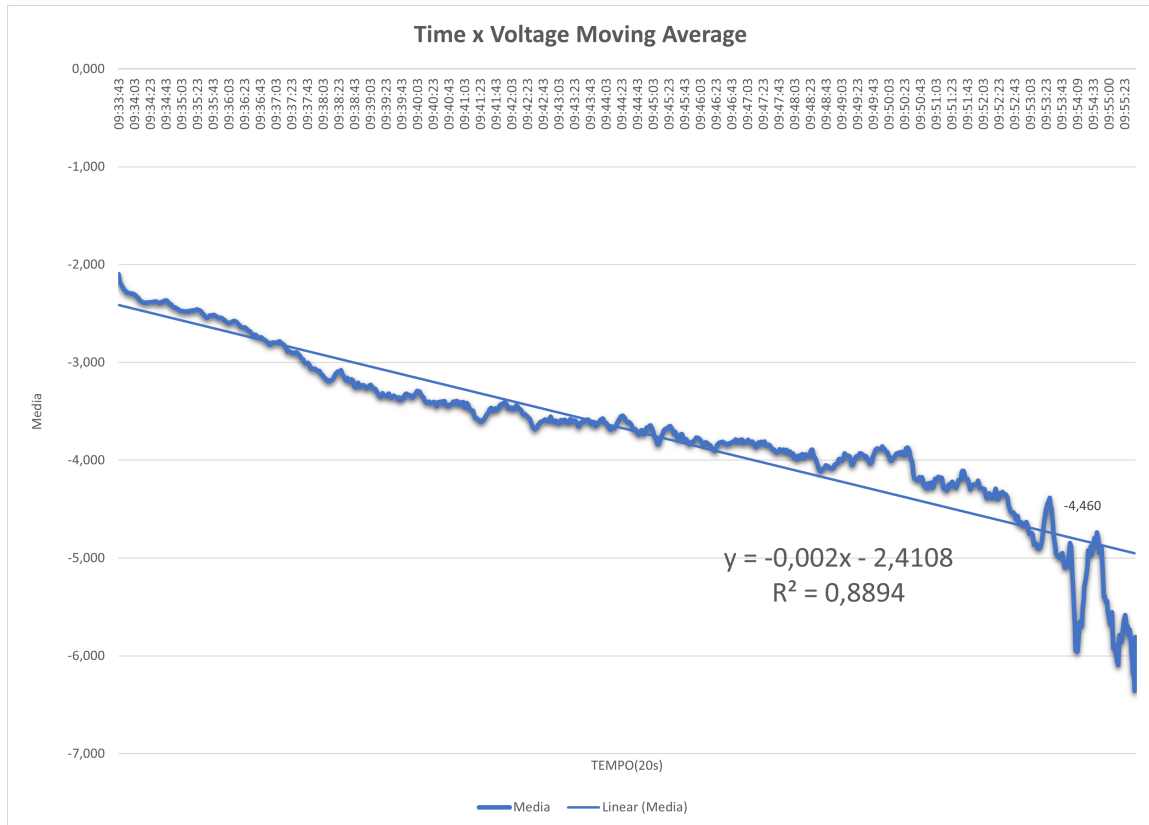


Figura 4.6: Aplicação de média móvel para obtenção de parâmetros de acordo com dados experimentais.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

obtenção e conferência dos parâmetros da equação do circuito RC.

Considera-se esta abordagem como uma tentativa de modelagem mais aprimorada, com o tratamento e análise dos dados no *software Matlab* que possui uma abordagem mais interativa, com mais elevada performance voltado para o cálculo numérico. Nesta metodologia empregou-se a regressão linear para encontrar a linha de tendência a partir dos dados experimentais, utilizando a média móvel e também parâmetros de cálculo do programa citado.

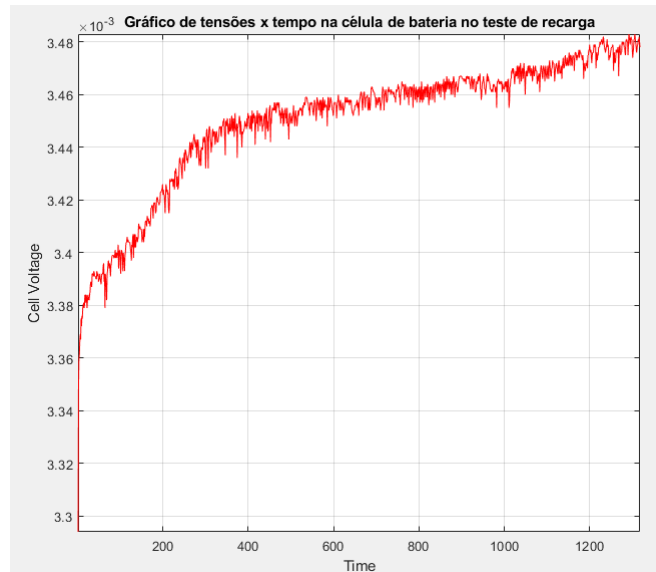


Figura 4.7: Caracterização da curva de recarga da célula de lítio em teste experimental.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

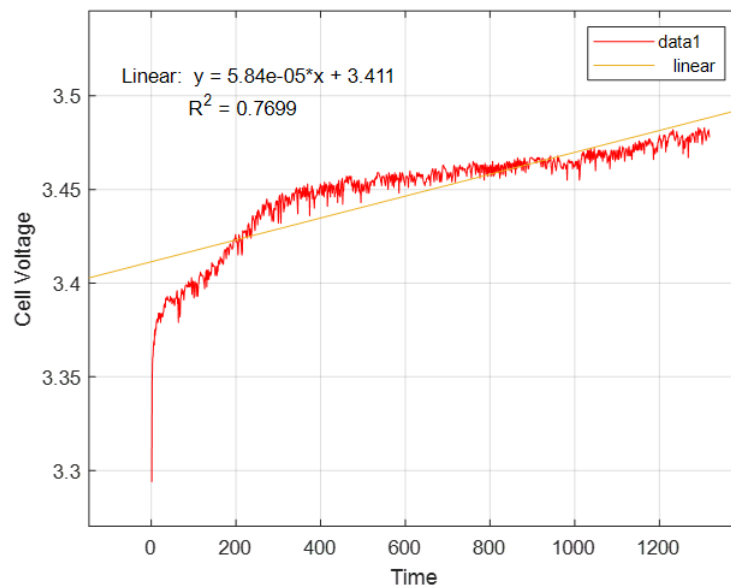


Figura 4.8: Linha de tendência, parâmetros e R quadrado obtidos da curva característica da célula em recarga.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Primeiramente o conjunto da amostra foi inserido no software para a análise da curva característica da célula de lítio utilizada no teste de recarga (Figura 4.7). Através

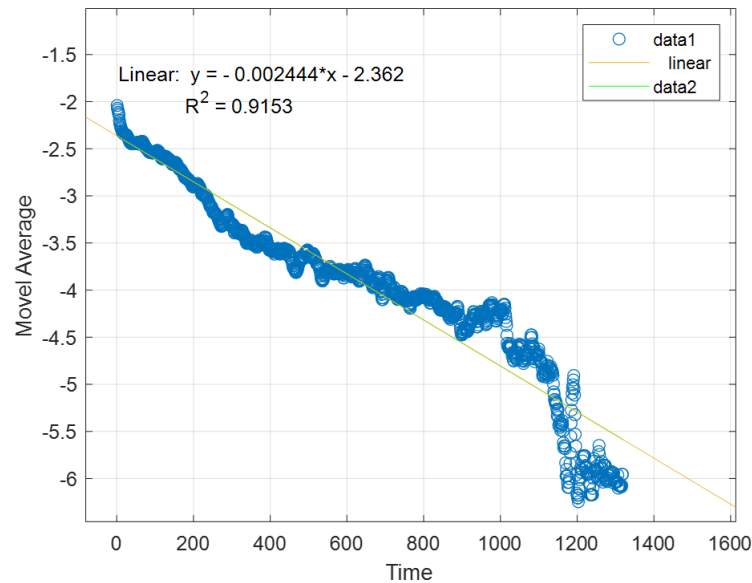


Figura 4.9: Regressão Linear da Amostra V x T com Filtro Polinomial e Média Móvel.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

da função *polyval* inserida no programa foi possível obter a linha de tendência da curva de recarga da célula (Figura 4.8), com o intuito de identificar a melhor aproximação da curva em parâmetros lineares e também desenvolver o processo de obtenção dos coeficientes da equação característica.

Visto que a linha de tendência obtida ainda é caracterizada por um resultado pouco similar a curva de recarga, a metodologia de modelagem matemática por regressão linear foi empregada para que os ruídos observados na amostra fossem mitigados. Assim, primeiramente considera-se a modelagem por inserção polinomial de primeira ordem para a obtenção da curva filtrada e posteriormente conjugada à linha de tendência com média móvel para dez valores por vez da amostra (Figura 4.9).

Uma abordagem alternativa, semelhante à primeira metodologia apresentada, foi utilizada para obter uma melhor correspondência entre a curva característica filtrada pela regressão linear e a linha de tendência, desta vez construída a partir da aplicação polinomial de primeira ordem na amostra de recarga experimental juntamente com o tratamento matemático dos dados por meio do cálculo da função logarítmica em $V(t)$ e posterior subtração deste resultado ao $V(0)$, representado na Figura 4.10. Observa-se,

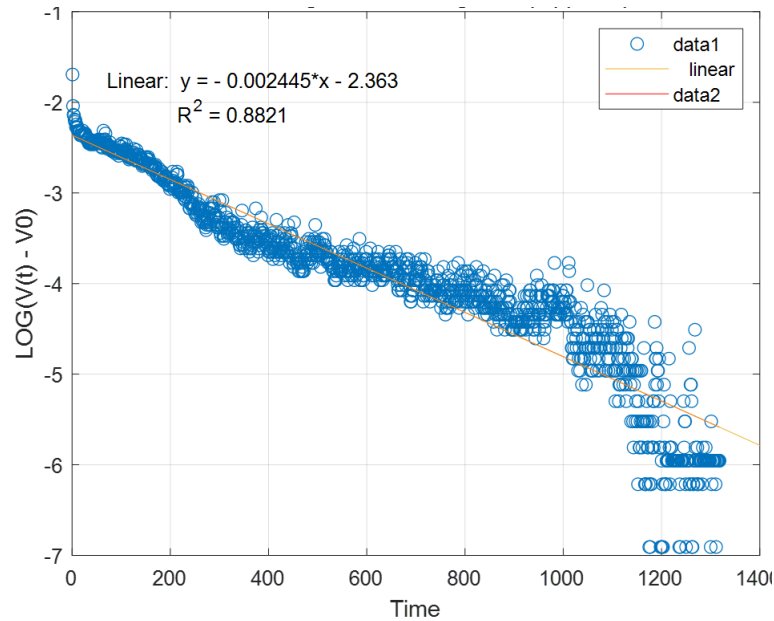


Figura 4.10: Regressão Linear e Linha de Tendência com $\text{LOG}(V(t) - V_0)$.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

porém, que a análise estatística pelo R quadrado apresenta melhor resultado para a metodologia polinomial e média móvel.

A partir dos dados experimentais de todas as 16 células e a aquisição das curvas características de cargas (Figura 4.4) observa-se que o gráfico pode ser fragmentado em regiões hipotéticas, para uma análise mais específica sobre o comportamento característico. Aplica-se também neste método a análise individualizada das células ao longo do tempo de recarga, principalmente sobre o parâmetro "tau" que supõe-se ser o fator característico de cada célula.

Com esta hipótese de abordagem, dividiu-se a curva característica em três tempos distintos, para que a manipulação em regressão linear e obtenção da linha de tendência fosse descomplicada e específica a cada região, como exemplificado na Figura 4.11 para três células para simplificar a explanação. Toma-se por suposição que a curva $V(t)$ pode ser decomposta pela soma das curvas de tensão de cada célula:

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t)$$

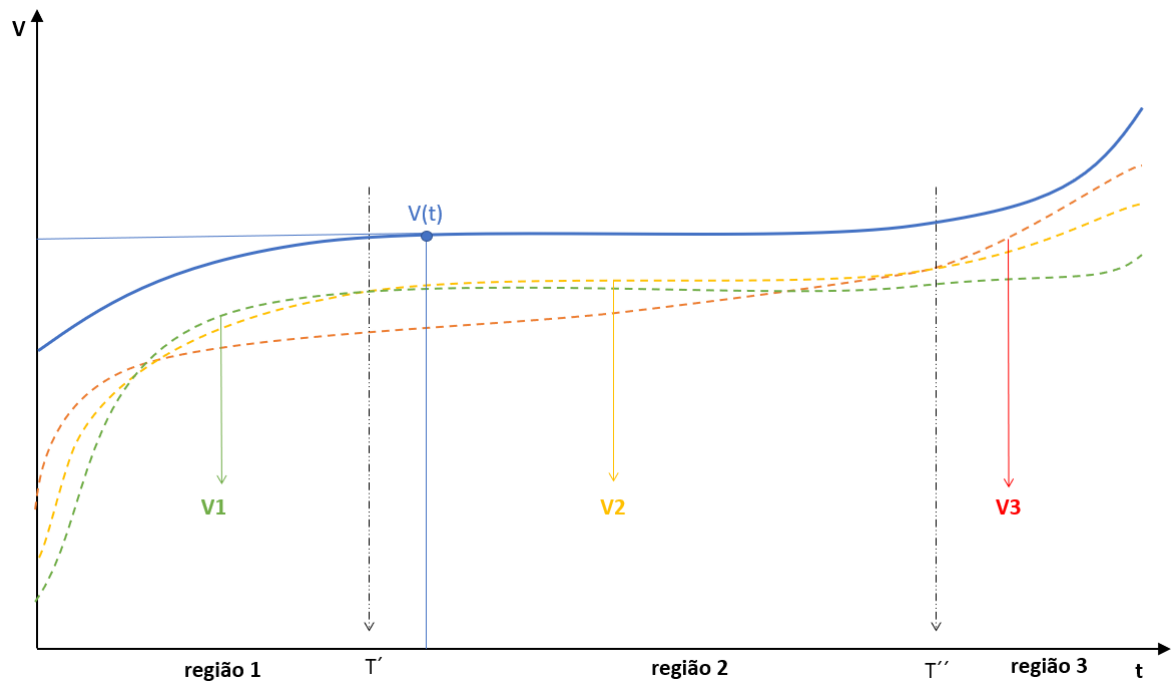


Figura 4.11: Hipótese de divisão da curva de recarga da célula em regiões distintas.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

(10)

Onde:

$$V1(t) = V0 * e^{\frac{-t1}{\tau1}}$$

$$V2(t) = V0 * e^{\frac{-t2}{\tau2}}$$

$$V3(t) = V0 * e^{\frac{-t3}{\tau3}}$$

Os tempos de cada região foram definidos de acordo com a observação da curva característica das 16 células e definição das regiões de acordo com a Figura 4.11. A partir desta hipótese a metodologia de abordagem foi o cálculo das constantes de tempo "tau" de cada célula em cada região, aplicando-se a regressão linear e a linha de tendência calculados matematicamente dentro do programa, para encontrar os parâmetros da equação e principalmente os três constantes de "tau". Para encontrar os parâmetros foi utilizado a ferramenta *Basic Fitting* do programa computacional *MatLab*. Os valores

estimados foram:

$$0 < t1 < 400 \quad [s]$$

$$401 < t2 < 1000 \quad [s]$$

$$1001 < t3 < 1300 \quad [s]$$

A notação "Vij" foi aplicada, para denominar "i" como o número da célula (1 a 16) e "j" para denominar a região do gráfico que é abordada (1 a 3). Primeiramente tomou-se uma célula, denominada de V1 (primeira célula da série de 16) para validar os critérios de proposta desta análise.

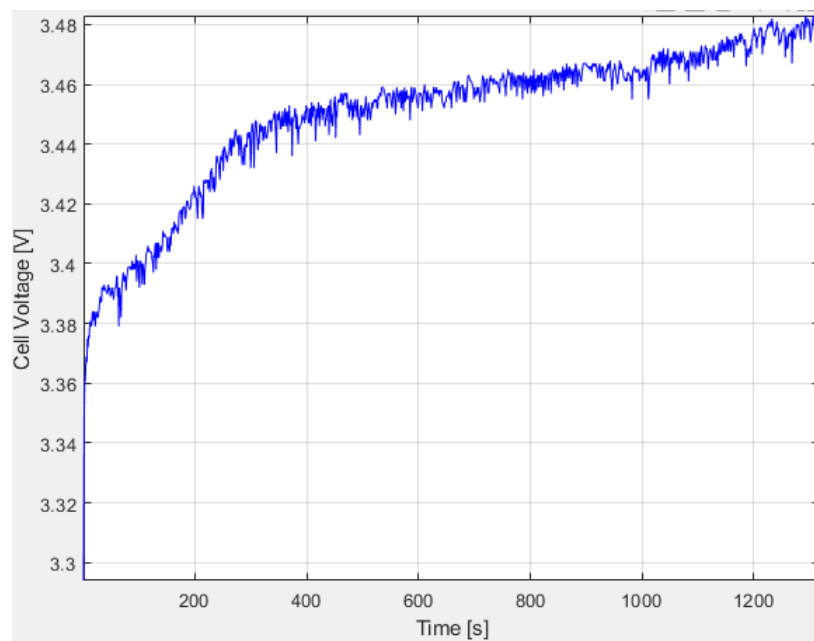


Figura 4.12: Gráfico tensão V11 x tempo t para a célula 1.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

```

% General model:
% Coefficients (with 95% confidence bounds):
    a =   -0.09925;   %(-0.1005, -0.09802)
    b =    0.003473;  %(0.003374, 0.003572)
    c =     3.471;   %(3.471, 3.472)
    V1_S1t = a*exp(-b*t)+c;

Voc = c;
tal = 1/b;

% Goodness of fit:
%   SSE: 0.03695
%   R-square: 0.9563
%   Adjusted R-square: 0.9562
%   RMSE: 0.005301

```

Figura 4.13: Equação e parâmetros ótimos encontrados no modelo para a primeira célula.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

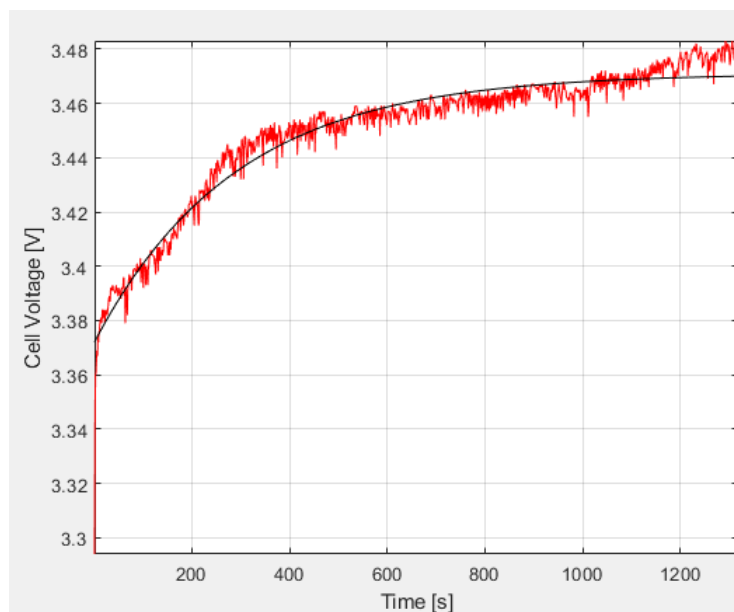


Figura 4.14: Gráfico tensão V11 x tempo t com implementação da análise em *Curve Fitting*.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Para esta célula foram desenvolvidos e analisados os gráficos de tensão por tempo (Figura 4.12). A partir dos dados experimentais para a primeira célula e o tempo, a lista foi implementada no programa para obtenção da equação que rege a curva e também

dos parâmetros demonstrados na Figura 4.13. Desta forma, a análise no aplicativo de cálculo do próprio *software* retornou como resultado uma equação ótima para a curva característica de recarga desta célula, com os parâmetros desta equação, e a Figura 4.14 demonstra o gráfico das duas curvas sobrepostas. Seguidamente, a análise foi repetida, porém desenvolvida para as curvas da célula com foco em cada região separadamente, e os parâmetros de cada gráfico foram igualmente obtidos.

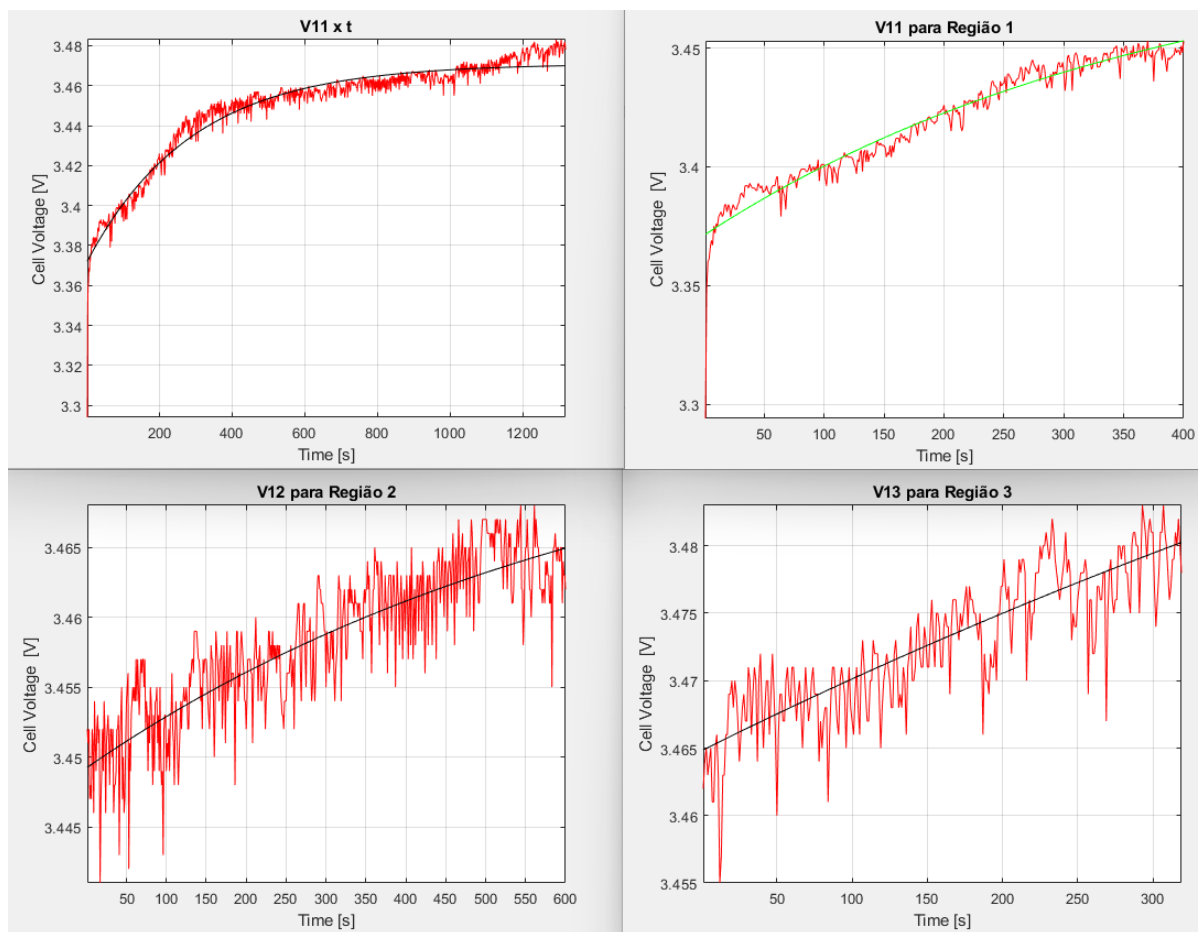


Figura 4.15: Gráfico tensão V11 x tempo t para cada região definida.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

A Figura 4.15 demonstra os gráficos plotados para a tensão da região 1, tensão da região 2 e tensão da região 3. Preliminarmente ao desenvolvimento desta metodologia para todas as 16 células da recarga foi observado que era possível ter o entendimento de qual melhor região a ser abordada para o tratamento de dados, visto que ao fazer

a análise visual gráfica de todas as 16 curvas das células da carga é possível aferir que em determinada região as células se comportam de maneira similar.

Também é possível observar que na região 3, a partir do instante em torno de 800s, as células começam a se desbalancear de forma mais agressiva e assim esse período foi caracterizado como crítico e de grande impacto para o resultado de não equalização das células ao fim do carregamento.

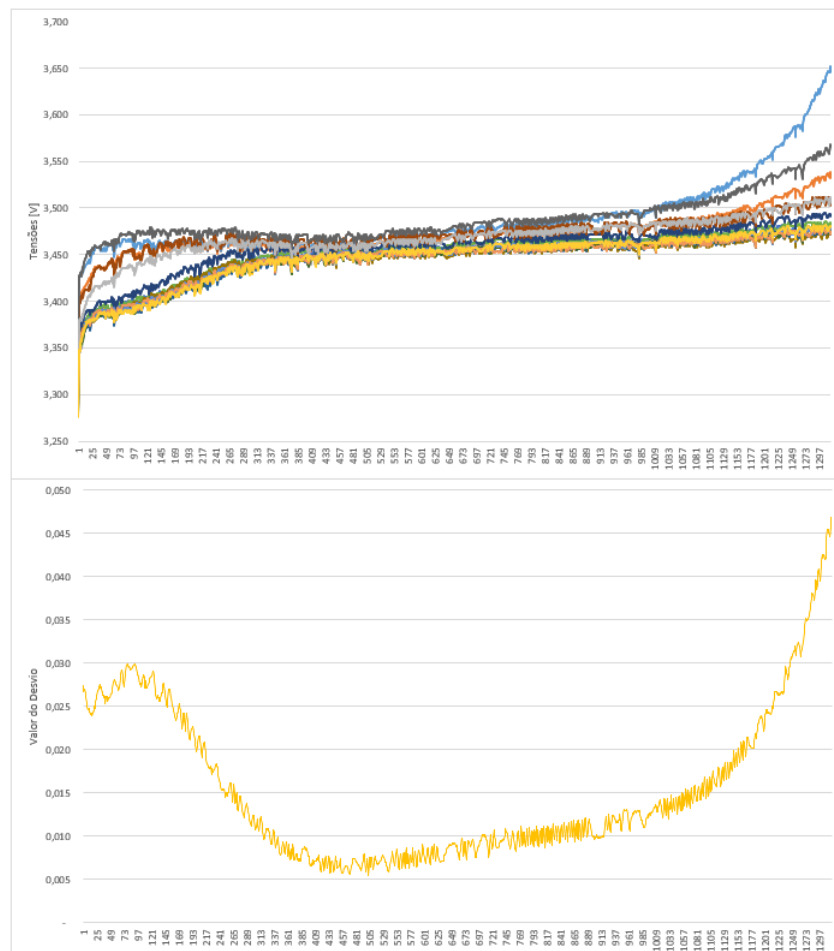


Figura 4.16: Gráficos de tensão em recarga das células (acima) e desvio padrão do processo (abaixo).

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Para saber de forma mais acurada em que período definir a região 3 e assim realizar as análises com foco nesta definição, a tratativa envolve a utilização do método de desvio padrão para analisar o quanto as células estavam desbalanceadas em deter-

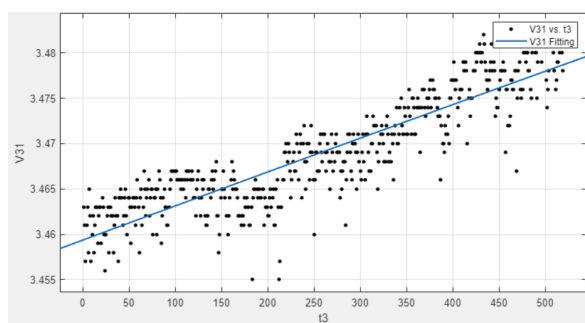
minado tempo e também em que ponto do carregamento começava o período crítico. O desvio padrão é comparado ao limite da diferença de tensão de balanceamento, com liberdade de escolha desse valor. Quanto menor a diferença em cada segundo, mais balanceadas estão as células naquele segundo. Desta forma, primeiramente foi calculado o valor médio de tensão em cada segundo de tempo sobre a amostra de 16 tensões e posteriormente foi-se aplicado o desvio padrão com base em todos os valores de tensão e no valor médio calculado (Figura 4.16).

Capítulo 5

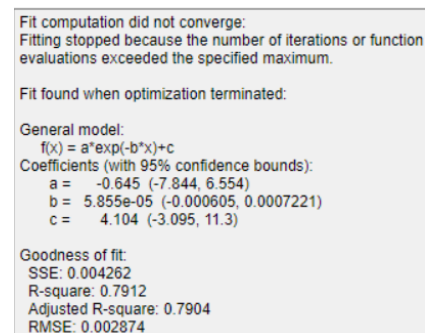
Resultados e Discussão

Tendo em vista a análise apresentada no capítulo 4, entende-se que a partir do instante $t=800s$ é o momento em que o desvio padrão demonstra aumento contínuo de forma significativa e assim o período de 800s a 1300s foi considerado para a análise da região 3 e foco nos dados da amostra para este tempo considerado.

Nesta fase implementou-se a utilização massiva do aplicativo *Curve Fitter* dentro do programa *MatLab*, para a análise das curvas de tensão e da equação gerada a partir do dado experimental, sempre com uma abordagem e foco no tempo definido para a região 3 (de maior desbalanceamento). As Figuras 5.1 a 5.16 demonstram a análise realizada e os coeficientes obtidos a partir da linha de tendência calculada pelo *software*.



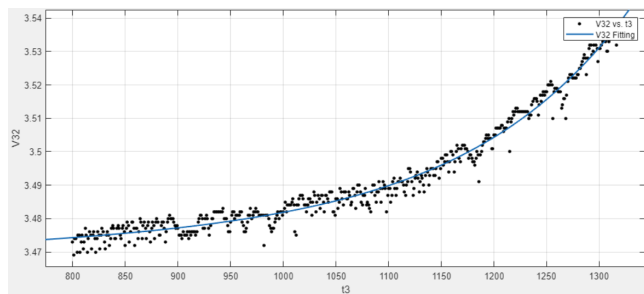
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



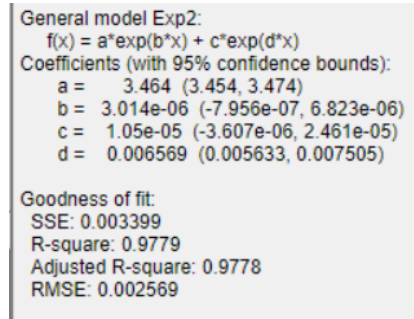
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.1: Curva característica e coeficientes para a célula 1 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



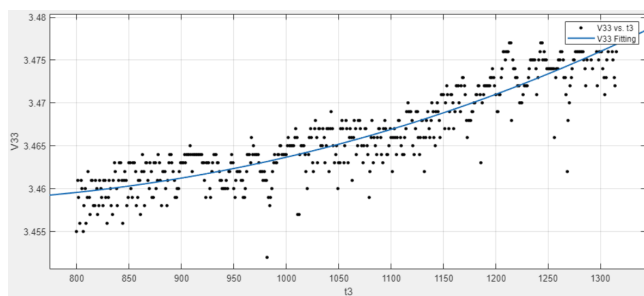
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



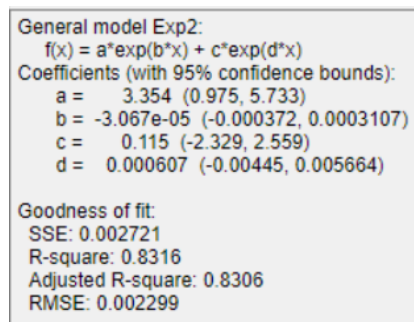
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.2: Curva característica e coeficientes para a célula 2 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



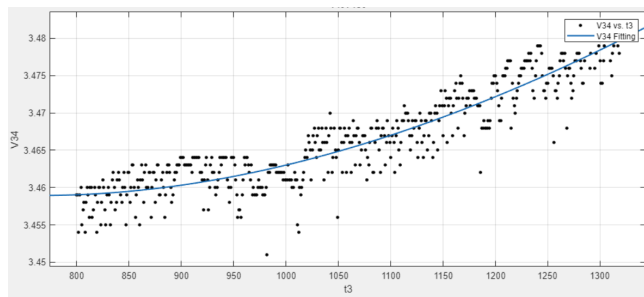
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.3: Curva característica e coeficientes para a célula 3 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.

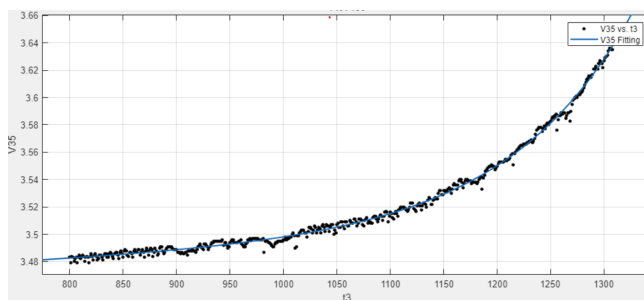
General model Exp2:
 $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 a = 0.3514 (-1.031, 1.734)
 b = -0.0009404 (-0.004978, 0.003097)
 c = 3.167 (1.626, 4.708)
 d = 4.891e-05 (-0.000109, 0.0002068)

Goodness of fit:
 SSE: 0.00355
 R-square: 0.8478
 Adjusted R-square: 0.8469
 RMSE: 0.002626

(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.4: Curva característica e coeficientes para a célula 4 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.

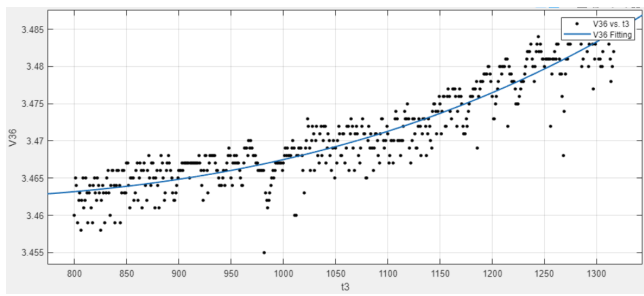
General model Exp2:
 $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 a = 3.451 (3.444, 3.458)
 b = 1.074e-05 (8.356e-06, 1.313e-05)
 c = 1.767e-06 (9.439e-07, 2.59e-06)
 d = 0.008611 (0.008274, 0.008948)

Goodness of fit:
 SSE: 0.003334
 R-square: 0.9965
 Adjusted R-square: 0.9965
 RMSE: 0.002544

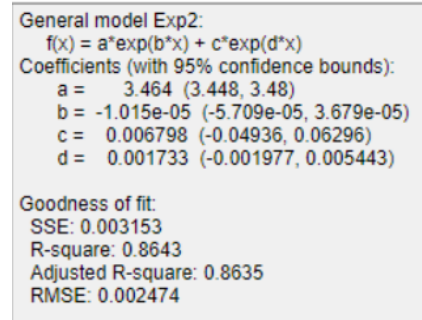
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.5: Curva característica e coeficientes para a célula 5 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



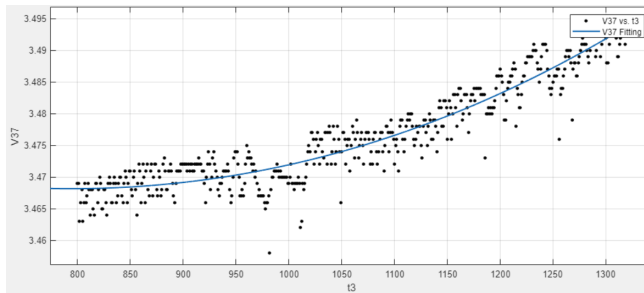
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



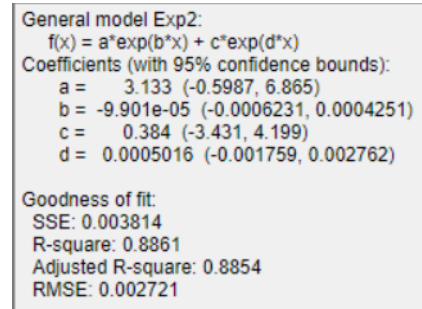
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.6: Curva característica e coeficientes para a célula 6 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



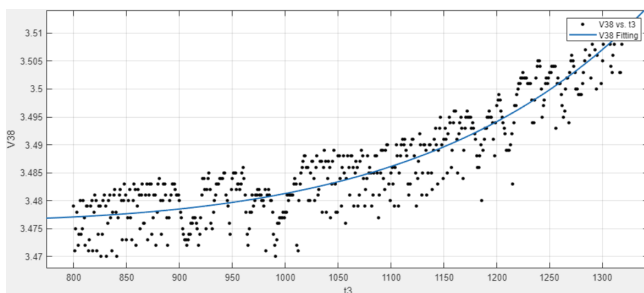
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



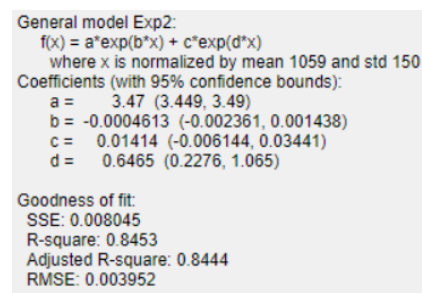
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.7: Curva característica e coeficientes para a célula 7 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



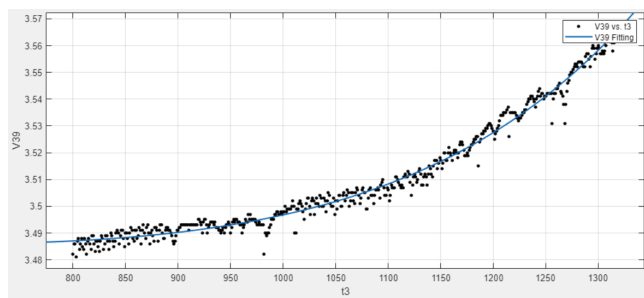
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



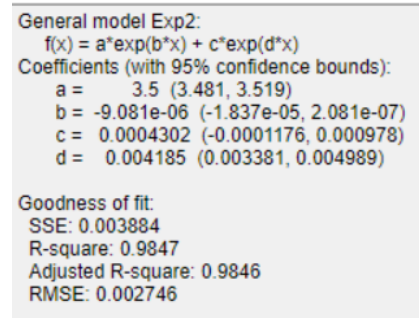
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.8: Curva característica e coeficientes para a célula 8 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



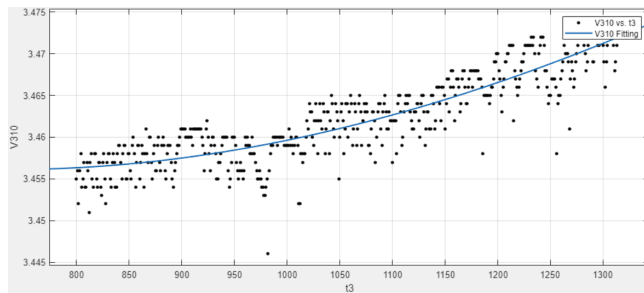
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



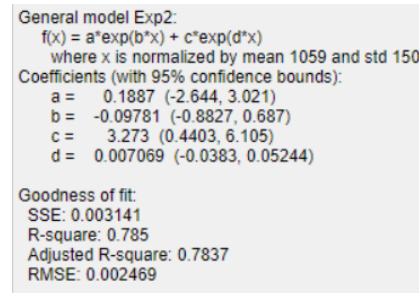
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.9: Curva característica e coeficientes para a célula 9 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



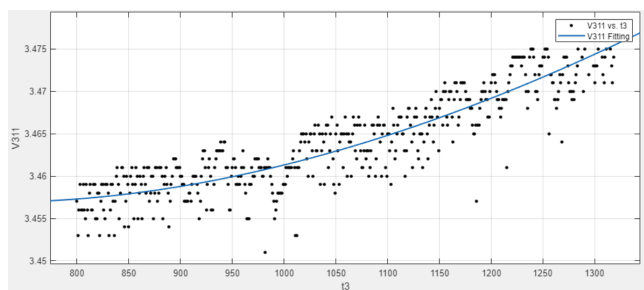
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



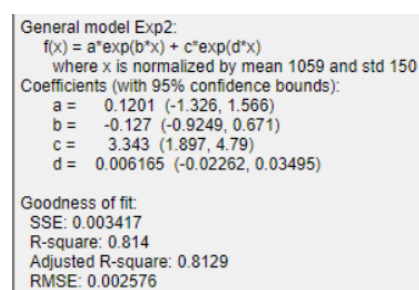
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.10: Curva característica e coeficientes para a célula 10 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



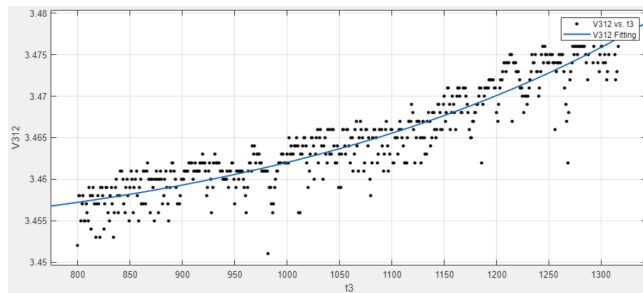
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



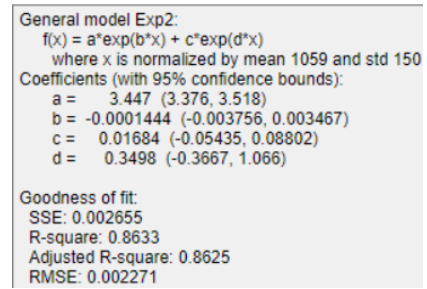
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.11: Curva característica e coeficientes para a célula 11 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

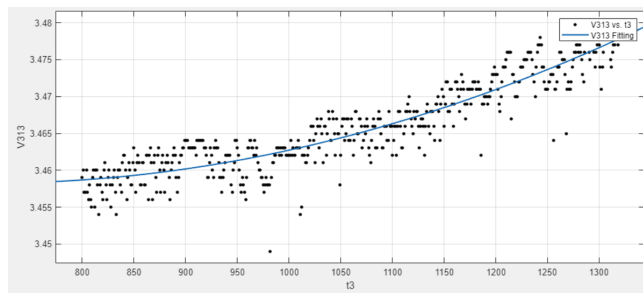


(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.

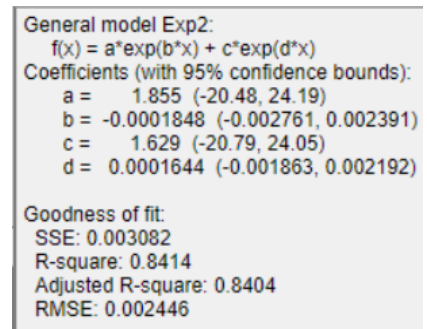


(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.12: Curva característica e coeficientes para a célula 12 na região 3.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

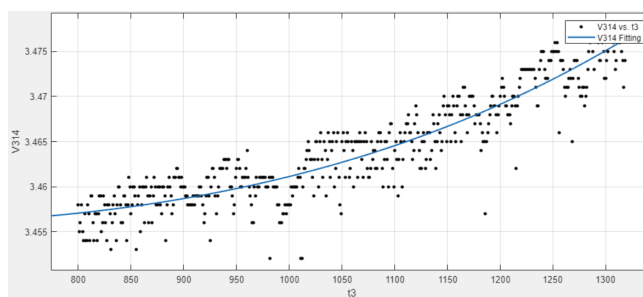


(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.

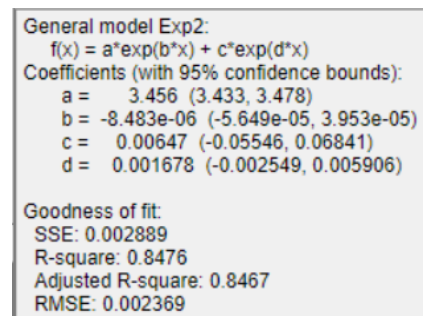


(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.13: Curva característica e coeficientes para a célula 13 na região 3.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

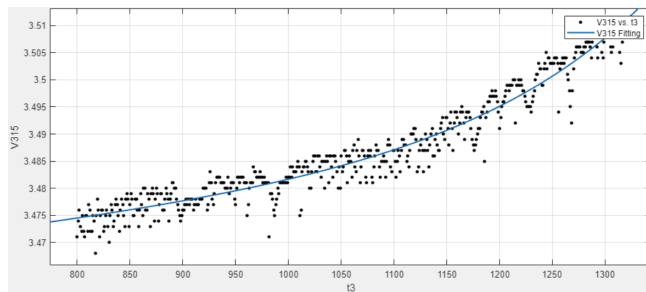


(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.

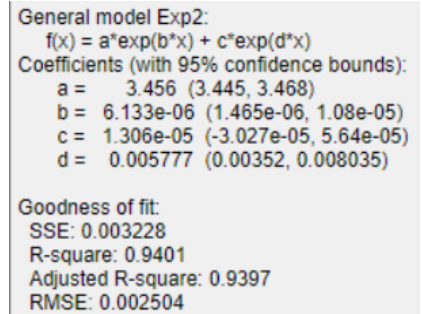


(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.14: Curva característica e coeficientes para a célula 14 na região 3.
Fonte: Acervo pessoal do autor.



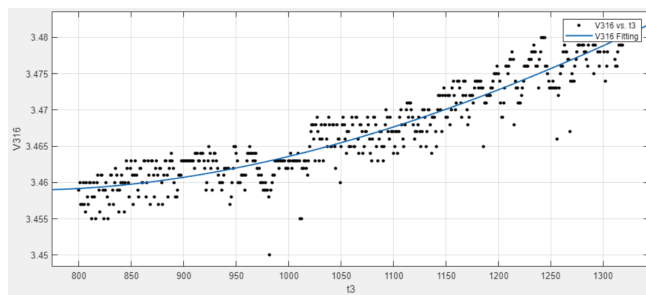
(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



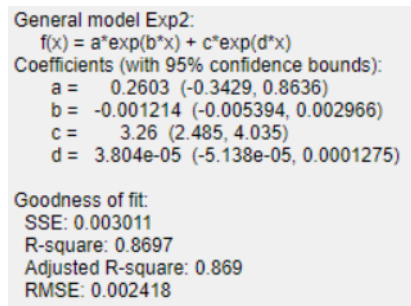
(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.15: Curva característica e coeficientes para a célula 15 na região 3.

Fonte: Acervo pessoal do autor.



(a) Curva de tensão e linha de tendência característica.



(b) Parâmetros da equação, coeficientes e R quadrado.

Figura 5.16: Curva característica e coeficientes para a célula 16 na região 3.

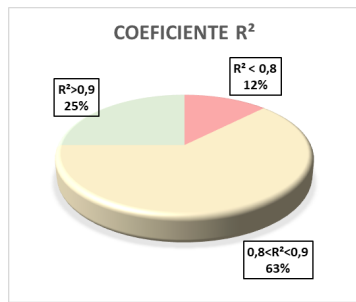
Fonte: Acervo pessoal do autor.

De posse dos gráficos gerados para cada uma das 16 células do módulo de baterias e com a obtenção dos parâmetros de equação como saída do programa, estima-se o valor da constante de tempo "tau" para cada célula no período da região 3, através de cálculos com os coeficientes obtidos no método de *Curve Fitting*, para executar a análise dos valores obtidos para esta constante e validação do modelo teórico com o modelo experimental. A Tabela 5.1 demonstra os valores obtidos para a constante de tempo de cada célula.

Tabela 5.1: Valores da constante de tempo "tau" de cada célula na região 3.
Fonte: Dados do autor.

Célula	Valores de "tau"
01	$9.2336e + 4$
02	$3.27332e + 5$
03	$-3.2605e + 4$
04	$-8.968e + 3$
05	$9.3109e + 4$
06	$-9.8522e + 4$
07	$-1.0099e + 4$
08	$-3.25626e + 5$
09	$-1.10120e + 5$
10	$-1.414e + 3$
11	$-1.192e + 3$
12	$-1.153402e + 6$
13	$-5.411e + 3$
14	$-1.17882e + 5$
15	$1.63052e + 5$
16	$-8.237e + 2$

Baseando-se nos dados da tabela 5.1 apresentada, observa-se a divergência entre os dados obtidos para a constante de tempo tanto em valor obtido quanto na polaridade deste, o que pode significar o reforço da característica de diferenciação entre as células, como também possivelmente expressa a não validação do modelo aplicado.



(a) Valores de incidência do coeficiente R quadrado nas 16 células avaliadas

Célula	R ²
1	0,7912
2	0,9779
3	0,8316
4	0,8478
5	0,9965
6	0,8643
7	0,8861
8	0,8453
9	0,9847
10	0,785
11	0,814
12	0,8633
13	0,8414
14	0,8476
15	0,9401
16	0,8697

(b) Valores de R quadrado para cada célula analisada.

Figura 5.17: Parâmetros obtidos para células de R mais baixo e a de R mais alto.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

O coeficiente R quadrado diverso entre as células (Figura 5.17) se mostra para algumas delas com resultado indevido (menor que 80%), outras com resultado de médio a bom (entre 80% e 90%) e algumas com valores em muito bom (maiores que 90%). Reforça-se que as análises ocorrem a partir do tempo 3 demonstrado, e mesmo com a correção no desbalanceamento em $t=800s$ aproximadamente, algumas células se mantêm com curvas diversas. Observa-se também nos parâmetros obtidos para uma das células de R mais baixo e a de R mais alto a discrepância nos valores destes coeficientes.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Considerações Finais

Em síntese, o objetivo do trabalho foi definir o comportamento e a característica de uma célula de lítio a partir de dados experimentais de recarga de um pack de baterias para caminhão elétrico de transporte na mineração. Portanto, foram abordadas a análise e manipulação dos dados por diferentes tipos de metodologias em posse das informações experimentais das células em um pack de baterias em estado de recarga. Considera-se o modelo elétrico para encontrar a equação padrão e os gráficos com o elemento característico de cada célula, a fim de analisar o comportamento similar e característica diversa das células e ideal dimensionamento do sistema de balanceamento desse conjunto. Explora-se também a hipótese de comparação dos dados experimentais com os resultados teóricos de manipulação para achar similaridades e validar o modelo proposto.

Para a primeira abordagem com a modelagem por circuito RC simples e hipótese da exponencial negativa observa-se que é possível a manipulação matemática por regressão linear, porém o método de utilização do *Excel* não foi suficiente para a modelagem da curva experimental como uma exponencial negativa e, por conseguinte, a aproximação à equação (7) para obtenção dos parâmetros não foi corretamente validada. Examina-se que para algumas células a aproximação é falha, ou por não similaridade com a curva característica ou pela obtenção do coeficiente R quadrado muito baixo.

Já no caso da modelagem por regressão linear e método polinomial a principal finalidade desta metodologia é a obtenção dos coeficientes da equação característica da curva de recarga da célula a partir da amostra experimental. Observa-se que é possível aproximar tal curva característica à uma exponencial negativa com o método polinomial empregado, porém a obtenção dos coeficientes da equação foi inadequada, principalmente porque os valores obtidos na simulação foram diversos do experimental e para algumas células a aplicação não foi validada, visto que seus parâmetros não foram adquiridos de forma correta pelo método utilizado e o R quadrado apresentou estimativa distante dos dados em teste.

Na hipótese de definição da constante de tempo "tau" por períodos de tempos definidos, em cada tempo t_1 , t_2 e t_3 a tensão $V(t)$ se configura como o resultado a soma das três tensões em $V_1(t)$, $V_2(t)$ e $V_3(t)$. Porém, para o período de tempo t_3 observa-se que as tensões divergem em nível mais alto e os valores da constante de tempo foram inconclusivos. Dessa forma, optou-se por definir os tempos por teste com análise do padrão das curvas em cada região do período destacado. Para as regiões 1 e 2 o modelo se adaptou muito bem, porém para a região 3 cada célula variou muito e não houve um padrão de curva que se adaptasse e portanto pudesse ser utilizado para obtenção dos coeficientes.

Por fim, emprega-se o método de priorização da região de carga, com análises focadas no período de tempo definido de acordo com o método de desvio padrão. Observa-se desta metodologia resultam-se valores de coeficientes muito diversos para determinadas células. Conclui-se que os valores da constante de tempo "tau" se divergem e com o coeficiente "R" quadrado muito baixo em determinadas curvas.

Portanto, não há um padrão de equação que se aplique igual e de forma adequada a todas as células do modo, cada célula tem uma curva diversa na região priorizada e caracterizada crítica por promover maior nível de desbalanceamento. Mesmo com a correção no desbalanceamento com foco no período a partir de 800 segundos, algumas células se mantêm com tensões diversas. A translação do gráfico auxilia a análise da variação de tensão em cada célula, visto que células com maior tensão carregam mais

rapidamente.

Destaca-se que na amostra das 16 células o método quantifica bem de acordo com o R demonstrado na Figura 5.17, por exemplo. Os resultados de maior indicência estão entre bom e ótimo (R quadrado entre 80% e 90%), embora expõe-se que não há validação ótima dos valores dos coeficientes. Mesmo com a aplicação dos métodos e das hipóteses expostas, há incoerência ao encontrar a curva de tensão padrão para todas as células que compõe o módulo 32S5P por modelo RC simples. O uso do modelo simples foi de forma proposital, tornando o método de análise cada vez mais complexo e levando em conta que no modelo RC há o domínio de qual região está sendo modelada.

6.2 Futuras Abordagens

Visto que este estudo foi construído em referência ao modelo de circuito equivalente, ou ECM, é viável pensar em um desenvolvimento que contemple a abordagem química da bateria, ou seja, o modelo eletroquímico. Uma abordagem fundamentalmente diferente pode ser adotada para modelar as células derivando equações - a partir da relação físico-química internas - que descrevem os processos eletroquímicos que ocorrem dentro da célula. A modelagem teórica por *Pseudo Two Dimensional* [43] com mecanismos complexos e aplicação de equações algébricas e diferenciais descreve características internas e externas da célula ao mesmo tempo e pode ser uma outra abordagem aplicável.

Outro procedimento possível é referenciar-se no modelo de circuito equivalente, mas com a inclusão de mais componentes no modelo, embora a simplicidade seja alterada. Estes componentes como indutores, capacitores e impedâncias, para obter a equivalência da célula do modelo com a experimentalmente testada. Em geral, para uma equivalência exata, um número infinito de resistores-capacitores são necessários, mas o circuito muitas vezes pode ser modelado acima de alguma faixa de frequência de interesse usando um pequeno número de pares resistor-capacitor, maior que o simples utilizado.

Cita-se os modelos *Grey Box* que leva em consideração algoritmos de carga e descarga para estimar o estado de carga (State of Charge (SOC)) e o *Black Box* que leva

em consideração o uso de lógica *Fuzzy*, redes neurais artificiais e *Machine Learning* para dimensionar o BMS e modelar parâmetros de carga e descarga de forma mais específica. [44]

É possível também o maior foco nos métodos de balanceamento e na região de maior diversidade de tensão do que na modelagem da curva $V(t)$ em si. Com a equivalência mais apurada do modelo com o desenvolvimento experimental, é possível simular o circuito de balanceamento em *software* próprio e estudar as possibilidades e dimensionamentos deste circuito de equalização, com possíveis construções de BMS mais simples para protótipo, como o trabalho em [45].

Recomenda-se, inicialmente para critérios de validação, balancear passivamente por meio da aplicação de resistores nas células de maior tensão, a partir da região 3 dos dados experimentais, com a regressão linear da curva de tensão e definição das resistências pelo coeficiente angular das curvas. A célula com o maior coeficiente angular recebe o componente com maior resistência.

Em seguida, é viável o desenvolvimento de um projeto de balanceamento ativo com microcontrolador de baixo custo e banco de resistores como os estudos em [46] e [47], com o foco no acionamento partir da região 3 dos dados experimentais, com os valores dos componentes do banco definidos pelo coeficiente angular da curva de tensão após aplicação da regressão linear.

Por fim, um possível próximo passo é a validação virtual em software como o *Matlab* por exemplo, para análise e comparação dos dados com o experimental e obter a validação da ideia de modelagem. Com o modelo validado é possível se especular como seria a recarga em taxas de $1C$ ou $0.5C$ e fazer testes de comportamento com estes parâmetros para um projeto mais apurado do sistema de balanceamento e gerenciamento das cargas na bateria.

Referências Bibliográficas

- [1] Júnior, Zenha, Recla, and Silva, “Desenvolvimento de uma metodologia para redução do consumo específico de diesel em caminhões fora de estrada em uma empresa do setor de mineração,” (*Gestão e Tecnologia para a Competitividade*), pp. 1–10, 2013.
- [2] F. A. G., “Proposta de sistema de detecção de irregularidades em estradas para caminhões fora de estrada via acelerômetro,” Master’s thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.
- [3] Komatsu, *Shop Manual 730E*. Komatsu, 1st ed.
- [4] J. Mazumdar, “All electric operation of ultraclass mining haul trucks,” in *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–5, 2013.
- [5] Y. Feng, Z. Dong, J. Yang, and R. Cheng, “Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks,” in *2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, pp. 1–6, 2016.
- [6] L. Johannesson, N. Murgovski, E. Jonasson, J. Hellgren, and B. Egardt, “Predictive energy management of hybrid long-haul trucks,” *Control Engineering Practice*, vol. 41, pp. 83–97, 2015.
- [7] B. U. Vasilev, P. S. Grigorev, and D. V. Mardashov, “Resource-saving electromechanical transmission of the mining truck,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1333, p. 052028, oct 2019.

- [8] T. Denton, *Electric and Hybrid Vehicles*. Automotive technology: vehicle maintenance and repair, Routledge, 2016.
- [9] M. Ehsani, K. Rahman, and H. Toliyat, “Propulsion system design of electric and hybrid vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 19–27, 1997.
- [10] “The first-ever electric car designed by porsche, the 1898 p1.” <https://arstechnica.com/cars/2020/02/check-out-the-first-ever-electric-car-designed-by-porsche-the-1898-p1/>. Acessado em 15/06/2021.
- [11] F. Msc, C. Msc, and J. R. Van Duin, “Automotive, the future of mobility,” in *2017 EVS30 Symposium*, pp. 1–15, 10 2017.
- [12] B. S. Innovation, “The solution for electric vehicles in commercial fleets,” 2012.
- [13] P. Wolfram and N. Lutsey, “Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions,” *The International Council on Clean Transportation: Washington, DC, USA*, pp. 1–23, 2016.
- [14] S. Ribeiro, S. Kobayashi, M. Beuthe, J. Gasca, D. Greene, D. Lee, Y. Muromachi, P. Newton, S. Plotkin, D. Sperling, R. Wit, and Zhou, “Transportation and its infrastructure,” *Institute of Transportation Studies, UC Davis, Institute of Transportation Studies, Working Paper Series*, 01 2007.
- [15] O. M. Ambiente, “Mobilidade elétrica: oportunidades para a latinoamérica,” 2016.
- [16] C. R. B. de Novais, “Mobilidade elétrica: Desafios e oportunidades,” 2016.
- [17] W. Koellner, G. Brown, J. Rodriguez, J. Pontt, P. Cortes, and H. Miranda, “Recent advances in mining haul trucks,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 321–329, 2004.

- [18] T. Jahns and V. Blasko, “Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 6, pp. 963–975, 2001.
- [19] J. Daan van Wyk, F. Lee, and D. Boroyevich, “Power electronics technology: present trends and future developments,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 6, pp. 799–802, 2001.
- [20] Y. Feng, Z. Dong, J. Yang, and R. Cheng, “Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks,” in *2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, pp. 1–6, 2016.
- [21] Komatsu, *Shop Manual 930E-2*. Komatsu, 1st ed.
- [22] P. Ribeiro, B. Johnson, M. Crow, A. Basa Arsoy, and Y. Liu, “Energy storage systems for advances power applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, pp. 1744 – 1756, 01 2002.
- [23] F. Barnes and J. Levine, *Large Energy Storage Systems Handbook*. Mechanical and Aerospace Engineering Series, CRC Press, 2011.
- [24] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, “Energy storage systems for automotive applications,” *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, 2008.
- [25] H. Bergveld, “Battery management systems : design by modelling,” *International Journal of Chemical Reactor Engineering - INT J CHEM REACT ENG*, 01 2001.
- [26] G. Pistoia and B. Liaw, *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety, and Cost*. Green Energy and Technology, Springer International Publishing, 2018.
- [27] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs*. EBL-Schweitzer, Artech House, 2010.

- [28] M. K. Sumukh Surya and A. Chhetri, “State of the art battery technology for automotive application.” <https://tec.ieee.org/newsletter/august-2022/state-of-the-art-battery-technology-for-automotive-application>, Agosto 2022. Acessado em 03/08/2022.
- [29] I. Buchmann and C. E. Inc, *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers*. Cadex Electronics, 2001.
- [30] N. Bocchi, L. C. Ferracin, and S. R. Biaggio, “Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental,”
- [31] J. Xu, X. Mei, H. Wang, H. Shi, Z. Sun, and Z. Zou, “A model based balancing system for battery energy storage systems,” *Journal of Energy Storage*, vol. 49, p. 104114, 2022.
- [32] J. Xu, X. Mei, and J. Wang, “A high power low-cost balancing system for battery strings,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2948–2953, 2019. Innovative Solutions for Energy Transitions.
- [33] H. S, “Overview of cell balancing methods for li-ion battery technology,” *Energy Storage*, vol. 3, no. 2, p. e203, 2021.
- [34] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, “State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362–19378, 2018.
- [35] Z. B. Omariba, L. Zhang, and D. Sun, “Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129335–129352, 2019.
- [36] S. W. Moore and P. J. Schneider, “A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems,” *Sae Publication*, vol. 2001010959, 2001.

- [37] G. Plett, *Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods*. Artech House power engineering and power electronics, Artech House, 2015.
- [38] Z. Chu, X. Feng, L. Lu, J. Li, X. Han, and M. Ouyang, “Non-destructive fast charging algorithm of lithium-ion batteries based on the control-oriented electrochemical model,” *Applied Energy*, vol. 204, pp. 1240–1250, 2017.
- [39] X. Feng, C. Weng, M. Ouyang, and J. Sun, “Online internal short circuit detection for a large format lithium ion battery,” *Applied Energy*, vol. 161, pp. 168–180, 2016.
- [40] L. Zhang, H. Peng, Z. Ning, M. Zhongqiang, and C.-Y. Sun, “Comparative research on rc equivalent circuit models for lithium-ion batteries of electric vehicles,” *Applied Sciences*, vol. 7, p. 1002, 09 2017.
- [41] N. Campagna, V. Castiglia, R. Miceli, R. A. Mastromauro, C. Spataro, M. Trapanese, and F. Viola, “Battery models for battery powered applications: A comparative study,” *Energies*, vol. 13, no. 16, 2020.
- [42] C. R. Zacharias, “Relatório circuito rc-dc.” <https://www.feg.unesp.br/paginas-pessoais/fisica-e-quimica/zacharias/ensino/fisica-exp-ii/>, Junho 2022.
- [43] A. Jokar, B. Rajabloo, M. Désilets, and M. Lacroix, “Review of simplified pseudo-two-dimensional models of lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 327, pp. 44–55, 2016.
- [44] S. Tamilselvi, S. Gunasundari, N. Karuppiah, A. Razak RK, S. Madhusudan, V. M. Nagarajan, T. Sathish, M. Z. M. Shamim, C. A. Saleel, and A. Afzal, “A review on battery modelling techniques,” *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10042, 2021.
- [45] N. Scharich, B. Schniter, A. Herbert, and M. S. Islam, “Battery management system using arduino,” in *2017 IEEE Technology & Engineering Management Conference (TEMSCON)*, pp. 384–387, 2017.

- [46] J. Xu, X. Mei, and J. Wang, “A high power low-cost balancing system for battery strings,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2948–2953, 2019. Innovative Solutions for Energy Transitions.
- [47] V.-L. Pham, V.-T. Duong, and W. Choi, “A low cost and fast cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery strings,” *Electronics*, vol. 9, no. 2, 2020.