



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Sistema de monitoramento de baterias íons de lítio**

**Gustavo Carvalho Vinand**

João Monlevade, MG  
2021

**Gustavo Carvalho Vinand**

# **Sistema de monitoramento de baterias íons de lítio**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Igor Dias Neto de Souza

**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**João Monlevade**  
**2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V766s Vinand, Gustavo Carvalho .  
Sistema de monitoramento de baterias íons de lítio. [manuscrito] /  
Gustavo Carvalho Vinand. - 2021.  
51 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Igor Dias Neto de Souza.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia  
Elétrica .

1. Baterias elétricas - Lítio. 2. Energia - Armazenamento. 3. Veículos  
elétricos. I. Souza, Igor Dias Neto de. II. Universidade Federal de Ouro  
Preto. III. Título.

CDU 621.313

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gustavo Carvalho Vinand**

### **Sistema de Monitoramento de Baterias Íons de Lítio**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 26 de agosto de 2021

#### Membros da banca

Dr. Igor Dias Neto de Souza - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Marcelo Moreira Tiago - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Welbert Alves Rodrigues - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Igor Dias Neto de Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Igor Dias Neto de Souza, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/09/2021, às 19:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0217703** e o código CRC **31775FC8**.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

À minha mãe Tacília por todo apoio emocional e incentivo para que este objetivo fosse alcançado.

Ao meu pai José Marcos, madrasta Polliany e irmãos Marcos Vinícius e Helena por todo carinho mesmo distante.

Aos amigos/irmãos da Boca de Balde, Felipe, Guilherme, José Arthur, Lincoln, Paulo, Pedro e Victor, com quem passei maior parte do meu tempo nos últimos anos.

Aos demais amigos que a faculdade me deu, Arthur, Alexandre, Igor, Iago, Rafael, Rodrigo, dentre outros, com quem convivi durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer como pessoa.

Ao professor Igor, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação para que fosse possível a concretização deste trabalho.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

À todos os professores da Universidade Federal de Ouro Preto, essenciais no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

# Resumo

Em busca de tornar o transporte rodoviário mais sustentável, os veículos elétricos são soluções que estão em crescente desenvolvimento. Há empecilhos para estes veículos se tornarem mais competitivos, como a bateria, que é um componente pesado, de alto custo e necessita de um circuito de proteção. Este trabalho apresenta um modelo de sistema de monitoramento de baterias de íons de lítio, baseado na observação dos parâmetros de temperatura, tensão, corrente e cálculo do estado de carga. Testes foram executados para análise do comportamento de resposta do sistema para valores de tensão e temperatura da célula estuda. Através de simulações, analisou-se comparativamente o resultado do estado de carga proposto com o estado de carga real.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos, baterias de íons de lítio, sistema de monitoramento de baterias, estado de carga.

# Abstract

Seeking to make road transport more sustainable, electric vehicles are solutions that are under increasing development. There are obstacles for these vehicles to become more competitive, such as the battery, which is a heavy, expensive component that needs a protection circuit. This work presents a model of a lithium ion battery monitoring system, based on observation of the parameters of temperature, voltage, current and calculation of the state of charge. Tests were performed to analyze the response behavior of the system for voltage and temperature values of the studied cell. Through simulations, it was analyzed comparatively the result of the proposed state of charge with the real state of charge.

**Keywords:** Electric vehicles, lithium batteries, battery monitoring system, state of charge.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura básica de um VE. . . . .	5
Figura 2 – Estrutura básica de um VEH série. . . . .	5
Figura 3 – Estrutura básica de um VEH paralelo. . . . .	6
Figura 4 – VEH série com carregador de baterias. . . . .	6
Figura 5 – Sistema de carga <i>off board</i> . . . . .	7
Figura 6 – Esquemático eletroquímico de uma célula na descarga. . . . .	9
Figura 7 – Esquemático eletroquímico de uma célula na recarga. . . . .	9
Figura 8 – Combinações de células. . . . .	10
Figura 9 – Região segura de operação das células de íons de lítio. . . . .	13
Figura 10 – Curva de carga em bateria íon de lítio usando método CCCV. . . . .	15
Figura 11 – Curvas de descarga em bateria íon de lítio para algumas taxas C. . . . .	16
Figura 12 – Estrutura básica do BMS em VE's. . . . .	17
Figura 13 – Estrutura do protótipo de monitoramento. . . . .	18
Figura 14 – Característica de Descarga Célula LFP. . . . .	20
Figura 15 – Conexão proposta das células. . . . .	21
Figura 16 – Arduino MEGA 2560. . . . .	21
Figura 17 – Circuito para monitorar uma célula. . . . .	23
Figura 18 – Porta lógica AND - configuração de diodos. . . . .	23
Figura 19 – Montagem do circuito de monitoramento de temperatura para o teste. . . . .	24
Figura 20 – Teste de superaquecimento da célula. . . . .	25
Figura 21 – Circuito para medir a tensão de uma das células. . . . .	26
Figura 22 – Teste de subtensão na célula. . . . .	27
Figura 23 – Teste de sobretensão na célula. . . . .	28
Figura 24 – Conversor Analógico Digital para duas células. . . . .	28
Figura 25 – Circuito para medir tensões das células. . . . .	29
Figura 26 – Modelo genérico célula íon de lítio. . . . .	31
Figura 27 – Célula LFP relação $V_{OCV} \times SoC$ . . . . .	32
Figura 28 – Circuito implementado o para cálculo do SoC. . . . .	33
Figura 29 – Circuito para medir a corrente da bateria. . . . .	34
Figura 30 – Sensor de corrente HKS2032. . . . .	35
Figura 31 – Simulação para descarga de 50A da bateria. . . . .	36
Figura 32 – Simulação para descarga de 100A da bateria. . . . .	37
Figura 33 – Simulação para carga de 20A da bateria. . . . .	38
Figura 34 – Simulação para carga de 50A da bateria. . . . .	38
Figura 35 – Simulação para carga de 20A da bateria. . . . .	39
Figura 36 – Simulação para carga de 50A da bateria. . . . .	40

Figura 37 – Circuito para comparar a temperatura das células. . . . .	46
Figura 38 – Circuito implementado via <i>Simulink</i> . . . . .	48
Figura 39 – Esquemático do circuito proposto para o monitoramento de baterias. . .	49
Figura 40 – PCB - Circuito de monitoramento de baterias - Vista Superior. . . . .	50
Figura 41 – PCB - Circuito de monitoramento de baterias - Vista Inferior. . . . .	51

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Identificação do Problema	2
1.2	Motivação	2
1.3	Proposta	3
1.4	Descrição dos próximos capítulos	3
<b>2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS</b>	<b>4</b>
2.1	Veículos Elétricos	4
2.1.1	Veículo Elétrico a Bateria - VEB	4
2.1.2	Veículo Elétrico Híbrido - VEH	5
<b>3</b>	<b>BATERIAS</b>	<b>8</b>
3.1	Configurações das células	10
3.2	Especificações técnicas	10
3.3	Baterias de Níquel Cádmio	11
3.4	Baterias de Níquel Hidreto Metálico	11
3.5	Baterias de Chumbo Ácido	12
3.6	Baterias de Íons de lítio	12
3.6.1	Formas de Carga	14
3.6.1.1	Carga por tensão constante (CV)	14
3.6.1.2	Carga por corrente constante (CC)	14
3.6.1.3	Carga por tensão e corrente constantes (CCCV)	15
3.6.2	Descarga	15
<b>4</b>	<b>SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BATERIAS ÍONS DE LÍTIO</b>	<b>17</b>
4.0.1	Célula $LiFePO_4$	19
4.0.2	Microcontrolador	21
<b>4.1</b>	<b>Circuito de monitoramento de temperatura</b>	<b>22</b>
4.1.1	Teste de monitoramento temperatura	23
<b>4.2</b>	<b>Circuito de monitoramento de tensão</b>	<b>25</b>
4.2.1	Teste de monitoramento de tensão	27
4.2.2	Monitoramento de tensão	28
<b>4.3</b>	<b>Estado de Carga</b>	<b>29</b>
4.3.1	Contagem de Coulomb	30
4.3.2	OCV ( <i>Open Circuit Voltage</i> )	30
4.3.3	Modelo Base	31

4.3.4	Algoritmos de estimativa de carga . . . . .	32
4.3.5	Estado de carga implementado . . . . .	33
4.3.5.1	Circuito de monitoramento de corrente . . . . .	34
4.3.6	Resultados para o cálculo de estado de carga implementado . . . . .	35
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>43</b>
	<b>Anexos . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>A</b>	<b>Especificações da bateria LFP-G100 . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>B</b>	<b>Circuito para comparar temperatura das células . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>C</b>	<b>Folha de dados sensor de corrente HKS2032 . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>D</b>	<b>Estado de carga implementado <i>Simulink</i> . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>E</b>	<b>Monitoramento de Baterias . . . . .</b>	<b>49</b>
E.1	Esquemático do circuito proposto . . . . .	49
E.2	Placa de Circuito Impresso . . . . .	50

# 1 Introdução

A evolução de veículos com motor a combustão é considerada umas das maiores conquistas da tecnologia moderna. Automóveis contribuíram para o crescimento da sociedade moderna satisfazendo muitas de suas necessidades de mobilidade no cotidiano. O crescimento avançado da indústria automobilística fez com que a sociedade passasse a ser mais desenvolvida industrialmente. Por outro lado, o grande número de veículos a combustão causa sérios problemas para o meio ambiente. Poluição do ar, aquecimento global e esgotamento de recursos petrolíferos são problemas que geram alta preocupação (EHSANI et al., 2010).

O Veículo Elétrico (VE) é visto como solução potencial para diminuir esses problemas devido à sua alta eficiência energética e baixa emissão de poluentes durante sua utilização (MARQUES, 2014). Este que possui mais vantagens comparado a veículos com motores à combustão, tais como ausência de emissões, funcionamento silencioso, alta eficiência entre outros (EHSANI et al., 2010). Veículos que sua propulsão é realizada a partir de um motor elétrico, seja ela total ou parcial, é definido como VE.

VE's tendem a ocupar espaço dos veículos a combustão, entretanto seu preço e autonomia são afetados por conta das baterias que são utilizadas no sistema de armazenamento de energia. De acordo com Marques (2014), as baterias são os componentes mais volumosos e caros de um VE. Além disso, ainda há limitações tecnológicas no estudo de baterias, como energia e potência específicas baixa, tempo de recarga e vida útil (RODRIGUES, 2014).

Baterias são dispositivos capazes de converter energia química em energia elétrica. Na literatura, as baterias são comumente caracterizadas de acordo com alguns termos como capacidade nominal, energia nominal, estado de carga (do inglês SOC, *State Of Charge*), dentre outros parâmetros e características que serão abordados mais profundamente no capítulo 3 deste trabalho.

Segundo Micheline (2017), as baterias mais comuns utilizadas em VE's são as de íons de lítio. Estas possuem algumas vantagens comparadas com as demais, como manutenção baixa e densidade de energia elevada. Além disso, elas causam menor dano ambiental quando descartadas. As de chumbo-ácido, por exemplo, são mais nocivas ao meio ambiente, pelo fato do chumbo ser uma substância tóxica.

Com intuito de melhorar o aproveitamento das baterias e conseqüentemente a operação do veículo elétrico de forma confiável e segura, torna-se de extrema importância a utilização de um sistema de gerenciamento de bateria (do inglês BMS, *Battery Management System*) como: comunicação entre veículo e bateria (XING et al., 2011). Portanto este sistema tem que ser capaz de monitorar e gerenciar a bateria com base na segurança, evitando que as baterias operem em condições anormais como subtensão, sobretensão e/ou

superaquecimento.

## 1.1 Identificação do Problema

O crescente movimento da utilização de veículos elétricos no mundo, aliado com a ideia de tornar os meios de transporte mais sustentáveis fazem aumentar os estudos científicos nesta área. A intenção é que veículos elétricos possam se tornar mais competitivos na briga por espaço contra veículos com motor a combustão interna. Sendo assim, tornar as baterias de íon de lítio mais confiáveis é primordial para aumentar a autonomia e melhorar o funcionamento dos veículos elétricos.

As baterias mais utilizadas em veículos elétricos são de íons de lítio, estas que possuem uma grande quantidade de energia. Com o propósito de estender sua vida útil e garantir a segurança dos usuários de um veículo elétrico, alguns cuidados são necessários, como controle de sobretensão, subtensão e temperatura.

A principal preocupação nesta área é relacionada ao descontrole térmico, que pode ocorrer devido à reações químicas das células ocasionando uma liberação de calor que poderia acarretar um incêndio. Uma célula sobrecarregada, um curto circuito ou uma alta taxa de descarga também causam fuga térmica, e são situações perigosas para as aplicações das baterias íons de lítio.

## 1.2 Motivação

Os veículos elétricos já são realidade para os fabricantes automobilísticos no mundo. Espera-se que esta evolução seja contínua de maneira geral no contexto mobilidade sustentável, por meio de novos materiais, baterias com maiores densidades de energia, maior vida útil e mais eficientes de modo geral. O preço também tende a diminuir para promover ainda mais a adesão dos meios sustentáveis para mobilidade elétrica.

Com o intuito de garantir com que as baterias íons de lítio possam operar em segurança, existem no mercado sistemas responsáveis pelo monitoramento e gerenciamento. Estes sistemas, além de aumentar a confiabilidade das baterias, maximiza o seu desempenho com mínimo de comprometimento de sua vida útil.

Estes sistemas são capazes de realizar controles de carga/descarga, balanceamentos das células da bateria, monitoramento de temperatura, indicar o estado de carga da bateria, dentre outras funcionalidades pertinentes para preservar a integridade das baterias de íons de lítio.

## 1.3 Proposta

Este trabalho tem como objetivo analisar a importância do monitoramento de baterias de íons de lítio dos veículos elétricos para que seja aprimorado o uso das mesmas, seguindo critérios de eficiência e segurança. Alguns objetivos visados para execução deste trabalho são:

- Estudar o funcionamento dos veículos elétricos presentes no mercado;
- Estudar as baterias de íons de lítio de acordo com suas características de carga e descarga, identificar suas características e aplicações;
- Desenvolver um protótipo de baixo custo que faça a leitura dos parâmetros tensão, corrente e temperatura das células presentes em uma bateria com auxílio de um microcontrolador;
- Desenvolver um circuito capaz de realizar o cálculo do estado de carga de uma bateria íon lítio com precisão;

## 1.4 Descrição dos próximos capítulos

O trabalho está organizado em 6 capítulos, o Capítulo 2 relata uma breve revisão teórica sobre os veículos elétricos. Capítulo 3 apresenta uma introdução sobre as baterias, tais como alguns tipos de baterias de íons de lítio e métodos de carga.

O Capítulo 4 é responsável por discutir sobre os sistemas de gerenciamento de baterias e alguns métodos utilizados para a estimação do estado de carga da bateria. Este capítulo também aborda a metodologia adotada para realização do trabalho, assim como os resultados obtidos através de testes experimentais.

O Capítulo 5 é destinado a apresentação dos esquemáticos elaborados e *layout* das placas de circuito impresso do protótipo. E por fim, o sexto capítulo contém a conclusão e proposta para desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2 Características dos Veículos Elétricos

### 2.1 Veículos Elétricos

Comparados a automóveis convencionais, os veículos elétricos (VE's) tem inúmeras vantagens, tais como alta eficiência, ausência de emissões de gases poluentes, são mais silenciosos, isenção de petróleo (caso não seja híbrido), dentre outras (EHSANI et al., 2010).

De acordo com a literatura os VE's circulavam antes mesmo dos veículos com motor de combustão interna. O motor elétrico existe desde meados do século XIX (LEITMAN; BRANT, 2009; LARMINIE; LOWRY, 2012). O primeiro VE que utilizava baterias secundárias (recarregáveis), foi projetado pelo francês Gustave Trouvé em 1881, era um triciclo que possuía um motor CC de 1 cavalo de potência, alimentado por baterias de chumbo-ácido, atingia 15km/h e percorria até 16km. Isto não era o suficiente para chamar a atenção do público, pelo fato de que estes preferiam a performance de carruagens movidas a cavalos (EHSANI et al., 2010).

Alguns anos depois, em 1894, foi produzido o primeiro VE comercial, projetado pelo engenheiro mecânico Henry G. Morris e pelo químico Pedro G. Shalom. Este veículo possuía uma autonomia de 40km, poderia atingir 32km/h, composto por dois motores de 1,5 cavalos de potência e suas baterias precisavam ser recarregadas por cerca de 90 minutos (EHSANI et al., 2010).

No início do século XX, os VE's aparentavam ser ótimos concorrentes no transporte rodoviário. Eram mais confiáveis do que os veículos com motor a combustão interna e a vapor. Mesmo com vantagem em relação aos outros veículos, os VE's perderiam espaço para os veículos com motor a combustão interna, devido ao preço do petróleo, que era relativamente barato (LARMINIE; LOWRY, 2012).

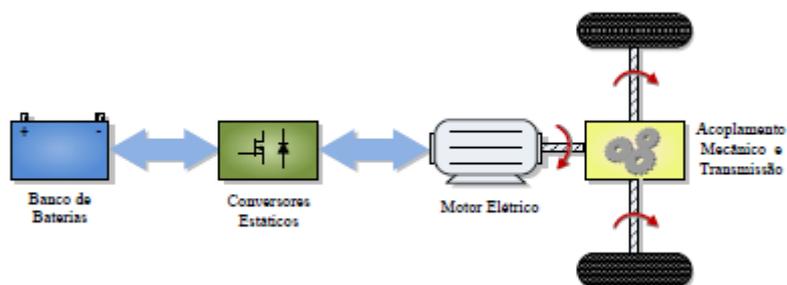
Conforme Larminie e Lowry (2012), os VE's podem ser separados em alguns tipos básicos. Veículo elétrico a bateria (VEB), veículo elétrico híbrido (VEH), veículo elétrico a célula de combustível (VECaC) que utilizam o hidrogênio para proporcionar a propulsão veicular e veículo elétrico fotovoltaico (VEFV) que se locomove com auxílio da energia solar.

#### 2.1.1 Veículo Elétrico a Bateria - VEB

Um VEB é composto essencialmente por um motor elétrico, bateria para armazenamento de energia, transmissão e conversores, como apresentado na Figura 1. A bateria tem a função de acionar o motor elétrico, através de conversores estáticos, que controlam o quanto de energia é entregue ao motor. No caso regenerativo, o quanto de energia o

motor devolve para a bateria. O acoplamento mecânico e transmissão, levam para as rodas do veículo o torque do motor elétrico. Geralmente, é desejável usar a frenagem regenerativa para recuperação de energia. Para isso, é necessário que o fluxo de energia entre a bateria e o motor seja bidirecional, com intuito de proporcionar maior eficiência ao VEB (LARMINIE; LOWRY, 2012; RODRIGUES, 2014).

Figura 1 – Estrutura básica de um VE.



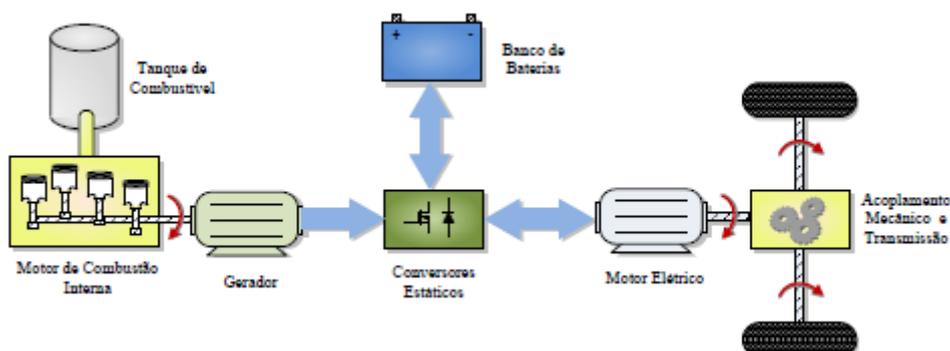
Fonte: Extraído de Rodrigues (2014).

### 2.1.2 Veículo Elétrico Híbrido - VEH

Um VEH tem duas ou mais fontes de energia. Os mais comuns são formados por um motor de combustão interna, uma bateria, um gerador e um motor elétrico. Segundo Larminie e Lowry (2012), existem duas topologias elementares para os VEH's: série e paralelo.

Para a configuração em série (Figura 2) o conjunto motor de combustão e gerador é responsável por transmitir energia para a recarga da bateria e ao motor elétrico. Pela análise de que um VEH série é composto por três máquinas (motor elétrico, gerador e motor a combustão interna), esta não é a configuração mais eficiente (RODRIGUES, 2014; EHSANI et al., 2010).

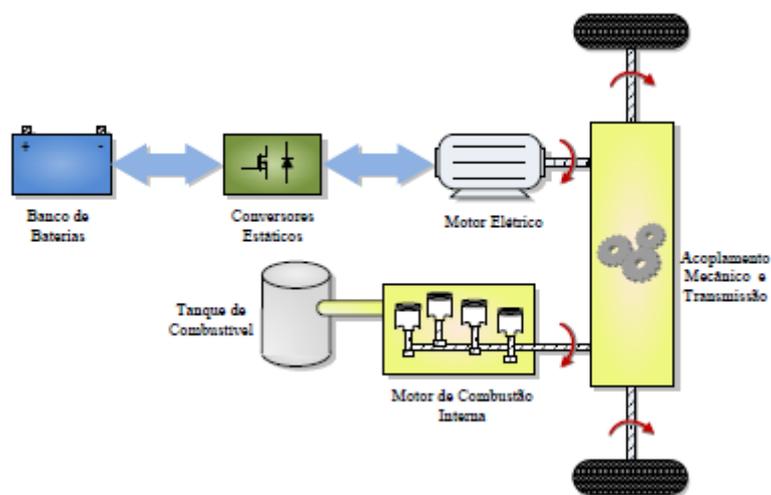
Figura 2 – Estrutura básica de um VEH série.



Fonte: Extraído de Rodrigues (2014).

Na configuração em paralelo (Figura 3) o motor a combustão interna está diretamente acoplado ao eixo das rodas do veículo. As baterias são recarregadas pelo motor elétrico a partir de frenagens regenerativas, quando o motor a combustão interna deve fornecer mais energia para o veículo.

Figura 3 – Estrutura básica de um VEH paralelo.

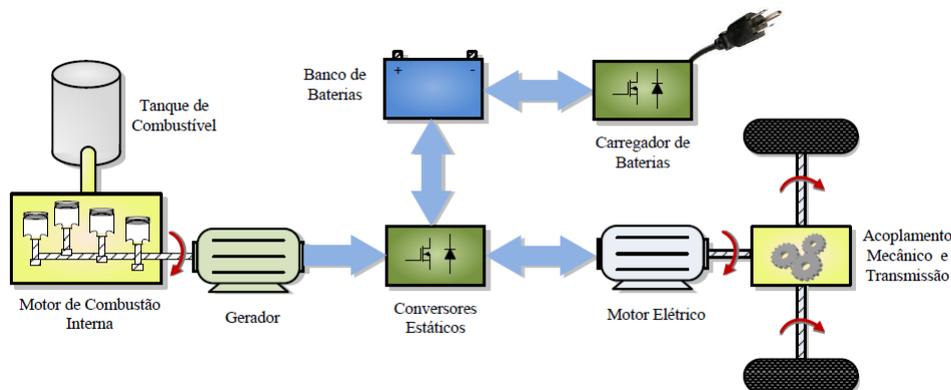


Fonte: Extraído de Rodrigues (2014).

Nos VEH's a bateria pode ser recarregada pelo gerador e/ou pelo motor elétrico enquanto se locomove, diminuindo assim o volume de baterias utilizadas, comparado com o VEB.

Ressalta-se que para as arquiteturas apresentadas dos VE's um carregador de baterias pode ser adicionado ao sistema, sendo possível a realização da carga utilizando a rede elétrica. Rodrigues (2014) ilustra o VEH série com o acréscimo do carregador de baterias, conforme Figura 4.

Figura 4 – VEH série com carregador de baterias.



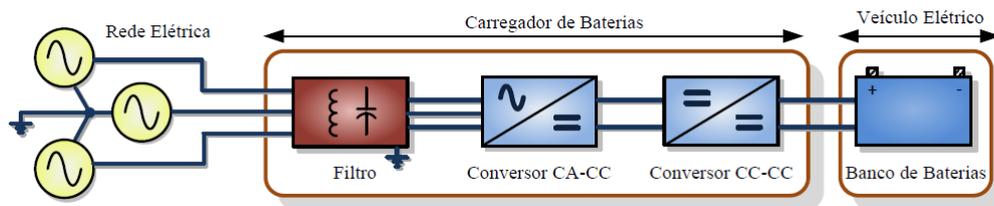
Fonte: Extraído de Rodrigues (2014).

O sistema de carga embutido no VE pode ser denominado de *on board*, estes que se situam a bordo do veículo, típico dos modelos disponíveis no mercado. Assume-se que o

carregamento ocorre quando o veículo não está em operação, durante a locomoção só se faz possível o carregamento da bateria por regeneração na frenagem. Há um aumento no peso e volume necessário para acomodação do carregador internamente no veículo elétrico.

Na Figura 5, destaca-se os carregadores *off boards*, conhecidos também como estações de recarga. Tal sistema é composto por filtros de linha e conversores eletrônicos de potência para adequar a conexão da rede elétrica CA com a bateria.

Figura 5 – Sistema de carga *off board*.



Fonte: Extraído de Rodrigues (2014).

No Brasil para que a utilização de VE possa ser expandida são necessários alguns aspectos como incentivos governamentais, desenvolvimento de tecnologias e infraestruturas de recarga. Já existe apoio por parte da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que em 2018 aprovou a resolução normativa n° 819, que torna possível registrar uma estação de recarga para órgãos e pessoas que estejam interessadas nos serviços de recarga para fins comerciais, desde que sigam as exigências normativas e premissas da agência (ANEEL, 2018).

## 3 Baterias

Conforme Michelini (2017), a bateria é um componente cujo o objetivo é converter energia química em energia elétrica, através de reação eletroquímica. Esta reação é conhecida como oxidação (perder elétrons) e redução (receber elétrons), que funciona de modo que envolva transferência de elétrons dos materiais que oxidam para os que reduzem através de um circuito elétrico. Para baterias secundárias ou recarregáveis, como são conhecidas, a reação eletroquímica deve ser capaz de ser revertida, invertendo o sentido da corrente.

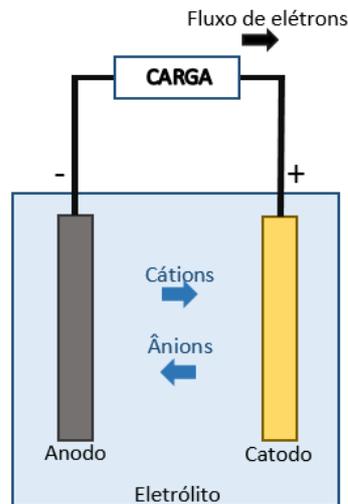
Uma bateria pode ser constituída a partir de uma ou mais células conectadas em série e/ou paralelo, de acordo com a necessidade de tensão e capacidade que a bateria possa entregar. Célula é nome dado a unidade eletroquímica básica (MICHELINI, 2017).

Uma célula essencialmente é formada por: anodo, catodo e eletrólito. O anodo ou polo negativo, é responsável por fornecer elétrons para o circuito conectado nas extremidades da célula, este sofre oxidação no processo eletroquímico. O catodo ou polo positivo, sofre redução no processo eletroquímico e tem a função de receber os elétrons do circuito. O eletrólito é uma solução com sais dissolvidos, com intuito de que ocorra a condutividade iônica.

Pela Figura 6, observa-se que quando a bateria está conectada a uma carga, os elétrons circulam do anodo para o catodo, onde o anodo é oxidado e o catodo reduzido. Completando o circuito elétrico com o eletrólito, há um fluxo de íons negativos (ânions) e íons positivos (cátions), estes que vão na direção do anodo e catodo respectivamente.

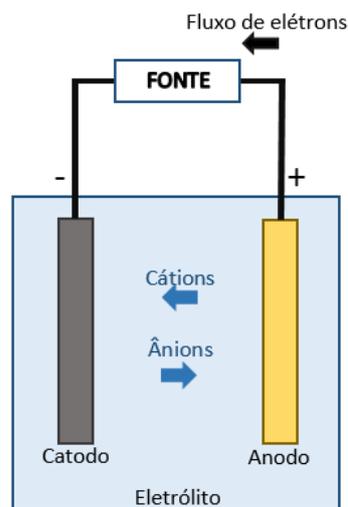
No processo de recarga da célula, visto na Figura 7, ocorre a inversão no sentido dos elétrons, e o processo de oxidação acontece no eletrodo positivo e a redução no eletrodo negativo.

Figura 6 – Esquemático eletroquímico de uma célula na descarga.



Fonte: Adaptado de Michelini (2017).

Figura 7 – Esquemático eletroquímico de uma célula na recarga.



Fonte: Adaptado de Michelini (2017).

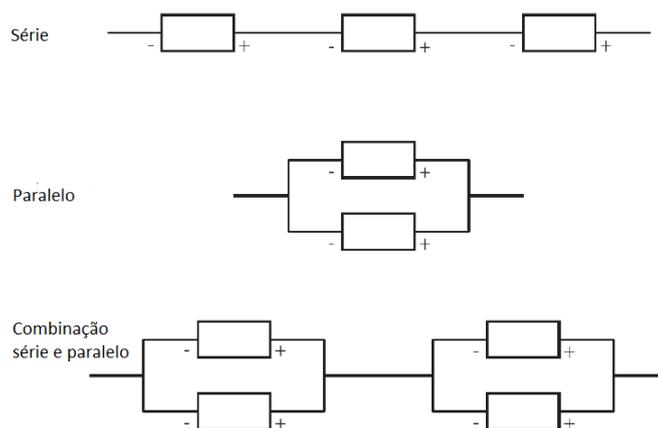
De modo geral, as baterias estão presentes em formatos diferentes, tais como: cilíndricas, prismáticas, tipo botão, entre outras (MICHELINI, 2017). Os tipos de baterias recarregáveis existentes são: Chumbo-ácido, Ni-Cd (Níquel Cádmio), Ni-MH (Níquel Hidreto Metálico) e Íons de Lítio.

De acordo com Lowe et al. (2010), estudos relacionados a energia e potência específica, custo, ciclos de vida e características dos materiais que compõem a bateria concluem que as baterias de íons de lítio são as mais vantajosas dentre as tecnologias.

## 3.1 Configurações das células

Uma bateria geralmente é constituída por duas ou mais células que são conectadas em série e/ou paralelo. Na conexão em série a tensão total da bateria é elevada e a corrente que a bateria pode entregar é mantida. Em paralelo, a tensão é a mesma de uma das células e a corrente a ser entregue é incrementada.

Figura 8 – Combinações de células.



Fonte: Extraído de Fisk e Leijgård (2010).

A partir da conexão das células, uma bateria é formada. Usualmente utilizam uma simplificação na nomenclatura para união destas células. Por exemplo, se uma bateria é composta por 10 células conectadas em série, repetidas em 4 conjuntos ligados em paralelo, esta conexão pode ser representada como 10s4p, totalizando 40 células. Se cada célula possuir uma especificação de 3.2V e 10Ah, a bateria resultante terá valores nominais de 32V e 40Ah.

## 3.2 Especificações técnicas

Terminologia geralmente utilizada nas indústrias, com o objetivo de caracterizar as baterias, de acordo com as suas condições de funcionamento. Conforme Michelini (2017), Larminie e Lowry (2012), alguns termos utilizados para descrever as baterias são:

- Tensão nominal - Valor referente a tensão de operação ou a média entre a tensão máxima na carga e mínima na descarga.
- Capacidade - Medida que indica o quanto de corrente se pode extrair de uma célula ou bateria em um determinado período de tempo, normalmente apresentada em Ampere-hora (Ah).
- Ciclos de vida - É o número de ciclos em que uma célula ou bateria pode ser carregada ou descarregada, até que não entreguem mais a capacidade especificada.

- Energia específica - É a relação entre a energia da célula e o seu peso, unidade de medida Wh/kg.
- Potencia específica - É a relação entre a potência fornecida da célula e o seu peso, unidade de medida W/kg.

### 3.3 Baterias de Níquel Cádmio

Baterias utilizadas comercialmente desde os anos 50, cuja algumas de suas aplicações são em walkie-talkies, câmeras fotográficas e ferramentas elétricas. Nestas baterias o eletrodo negativo é formado por Cádmio ( $Cd$ ) e Hidróxido de Cádmio ( $CdOH_2$ ) e eletrodo positivo é composto por Hidróxido de Níquel ( $NiOH_2$ ) e o eletrólito é formado pela solução aquosa de Hidróxido de Potássio ( $KOH$ ) (MICHELINI, 2017). A tensão nominal das células é de 1,2V.

Algumas vantagens dessas baterias são que as mesmas reagem melhor a cargas rápidas, alto número de ciclos de carga e descarga, longevidade de armazenamento independente do estado de carga e custo baixo se comparada com as demais baterias.

As baterias de Níquel Cádmio ( $NiCd$ ) vieram a perder espaço no final dos anos 90 devido conter metais tóxicos e serem prejudiciais ao meio ambiente, além do efeito memória que é responsável por queda na capacidade de carga devido aos ciclos de carga/descarga. Desde então vem sendo substituídas por baterias de Níquel Hidreto Metálico ( $NiMH$ ) ou de Íons de Lítio.

### 3.4 Baterias de Níquel Hidreto Metálico

As baterias de Níquel Hidreto Metálico ( $NiMH$ ) estão presentes em telefones celulares, notebooks e câmeras digitais antigas. São baterias que apresentam maior capacidade (50% a 100%) que as baterias NiCd e não tóxicas e que não causam danos ao meio ambiente. Sua composição química comparada a bateria NiCd, nas baterias de NiMH o Hidreto Metálico substitui o eletrodo negativo que contém Cádmio, o eletrodo positivo e eletrólito são semelhantes (MICHELINI, 2017).

Assim com as células de NiCd as de NiMH também apresentam tensão nominal de 1,2V. Apresentam um menor efeito memória, não tóxica e não causa dano ao meio ambiente.

Em contrapartida são baterias que apresentam corrente limitada de descarga. Estudos afirmam que melhores resultados são alcançados com correntes de descarga de 20% a 50% da corrente nominal (0,2C a 0,5C).

### 3.5 Baterias de Chumbo Ácido

Atualmente as baterias de Chumbo Ácido são utilizadas em *nobreaks*, automóveis, equipamentos hospitalares e empilhadeiras. Em aplicações onde o peso pode ser ignorado estas são as baterias mais econômicas.

De acordo com Michelinini (2017) existem duas designações destas baterias, são elas: bateria selada SLA (do inglês *Sealed Lead Acid*) e bateria regulada por válvula VRLA (do inglês *Valve Regulated Lead Acid*).

As baterias SLA trabalham em média em faixas de capacidades que vão de 0,2Ah até 30Ah, com aplicabilidade em textitnobreaks para computadores, cadeiras de rodas elétricas e iluminação de emergência.

As baterias VRLA são utilizadas em aplicações estacionárias, são vistas em *nobreaks* de grande porte. São baterias baratas e de simples fabricação, tecnologia madura e confiável, capaz de elevadas taxas de descargas.

### 3.6 Baterias de Íons de lítio

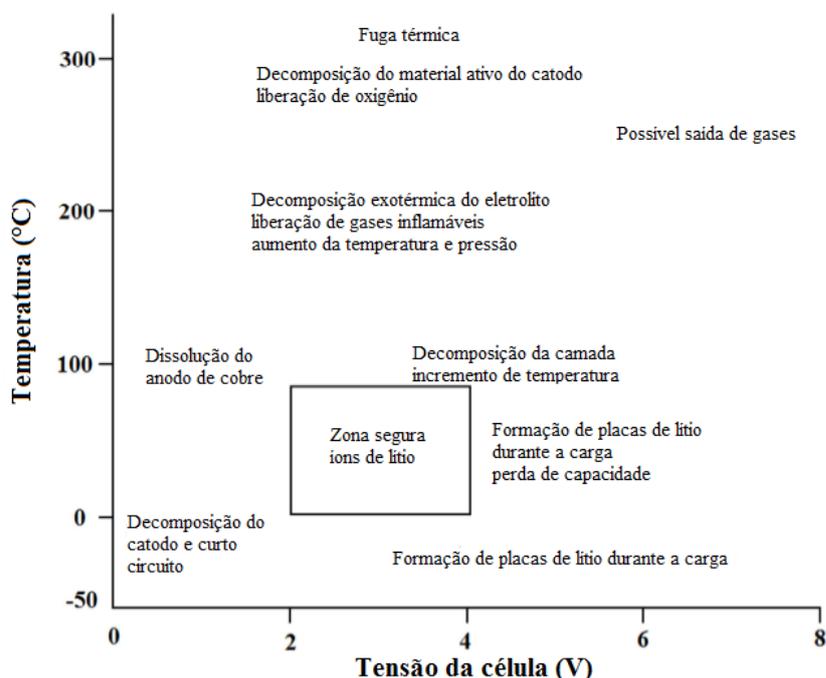
Baterias que foram introduzidas nos anos 90, e que são consideradas as baterias recarregáveis cuja tecnologia é a mais promissora para o futuro (EHSANI et al., 2010; MICHELINI, 2017).

Uma das vantagens das baterias de íons de lítio, é que estas são mais leves em relação às outras, pelo fato de que o lítio é o metal mais leve de todos os outros utilizados na fabricação de baterias. Em relação à energia específica, Larminie e Lowry (2012) afirmam que é três vezes maior que a das baterias de chumbo-ácido, podendo dar ao veículo uma autonomia maior.

As baterias de íons de lítio formam uma classe de produtos químicos de várias combinações de materiais. As tecnologias mais expressivas para as aplicações automotivas, presentes no mercado, são Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto (NMC), Lítio-Manganês-Espinélio (LMO), Lítio-Níquel-Cobalto-Alumínio (NCA) e Lítio-Ferro-Fosfato (LFP). Cada tipo tem vantagens e desvantagens diferentes em termos de segurança, desempenho, custo e outros parâmetros (MARQUES, 2014; LU et al., 2013).

Para o melhor desempenho e segurança, é necessário que haja cuidados com as células de íons de lítio. Os parâmetros vitais para operação são temperatura e tensão. A Figura 9 apresenta região segura de operação destas células, em relação à temperatura e tensão. Também exibe os riscos que podem ser acarretados caso operem fora desta faixa segura.

Figura 9 – Região segura de operação das células de íons de lítio.



Fonte: Adaptado de Illera (2014).

Baixas temperaturas podem resultar na diminuição de corrente entregue pela célula, pois reduzem o número de reações químicas que ocorrem dentro da célula (LU et al., 2013). Já em altas temperaturas, as reações químicas dentro da célula aumentam consideravelmente, ocasionando assim uma elevação na corrente gerada por ela (MARQUES, 2014).

Conforme Illera (2014), tensões elevadas, geralmente acima de 4,2V, geram correntes superiores a nominal, e podem provocar um superaquecimento pelo efeito Joule. Em células de íons de lítio que estejam com tensão abaixo de 2V, o funcionamento das células de íon de lítio pode ser prejudicado pelo anodo e catodo da célula (LIPU et al., 2018).

Analisando os riscos de uso indevido destas células, o excesso de temperatura pode ser considerado o pior inimigo para melhor performance da célula (LIPU et al., 2018). Se torna indiscutível que é necessário o controle de tensão e temperatura, para garantir a segurança e vida útil da bateria (ILLERA, 2014).

A Tabela 1 apresenta um resumo de algumas características das baterias apresentadas neste capítulo.

Tabela 1 – Resumo das especificações técnicas das baterias.

<i>Tipo de Bateria</i>	<i>NiCd</i>	<i>NiMH</i>	<i>Chumbo Ácido</i>	<i>Íons de Lítio</i>
<b>Energia Específica (Wh/kg)</b>	40-60	60	35	120
<b>Potência Específica (W/kg)</b>	150	250-1000	180	1800
<b>Ciclos de vida</b>	2000	2000	4500	3500
<b>Características</b>	Tóxica, efeito memória	Não tóxica, tensão de 1,2V	Baixo custo, alta confiabilidade	Leve, tensão de 3,2V
<b>Aplicação</b>	Ferramentas elétricas	Notebooks	Veículos, Nobreaks	Veículos elétricos, Eletrônicos

Fonte: Adaptado de Lowe et al. (2010).

### 3.6.1 Formas de Carga

Os métodos de carregamento das baterias de íons de lítio são caracterizados pelo tempo que a bateria leva para receber a corrente proveniente de um determinado carregador. Para qualquer tipo de bateria é necessário que as grandezas de tensão e corrente sejam controladas no conjunto da bateria durante carga e descarga, para que seja possível assegurar que a vida seja protegida e recarga segura. A carga de uma determinada bateria pode ser realizada a partir de corrente constante, tensão constante ou até mesmo um combinação destes métodos.

A sobrecarga é prejudicial as células de íons de lítio podendo resultar na degradação da capacidade das mesmas. O término antecipado de carga devido às funções de segurança contra sobrecarga também podem resultar em efeitos negativos na capacidade disponível da célula. As funções de segurança abortam o carregamento assim que uma célula atinge seu limite de sobretensão. As outras células serão então subcarregadas, resultando em uma capacidade disponível reduzida. Esses problemas podem ser resolvidos por meio do balanceamento de células, função esta que é implementada no sistema de gerenciamento de bateria, aumentando a capacidade disponível e a vida útil da bateria (FISK; LEIJGÅRD, 2010).

#### 3.6.1.1 Carga por tensão constante (CV)

Uma tensão constante é aplicada até que a tensão da bateria atinja à tensão de carga, a partir da sua condição a corrente de carga é determinada. Este método, combinado com funções de segurança, pode ser usado para carregar baterias de íons de lítio, desde que a corrente seja limitada.

#### 3.6.1.2 Carga por corrente constante (CC)

A tensão varia no momento da carga, enquanto a corrente permanece em um valor fixo. O carregamento é finalizado quando a tensão atinge o valor máxima da bateria que

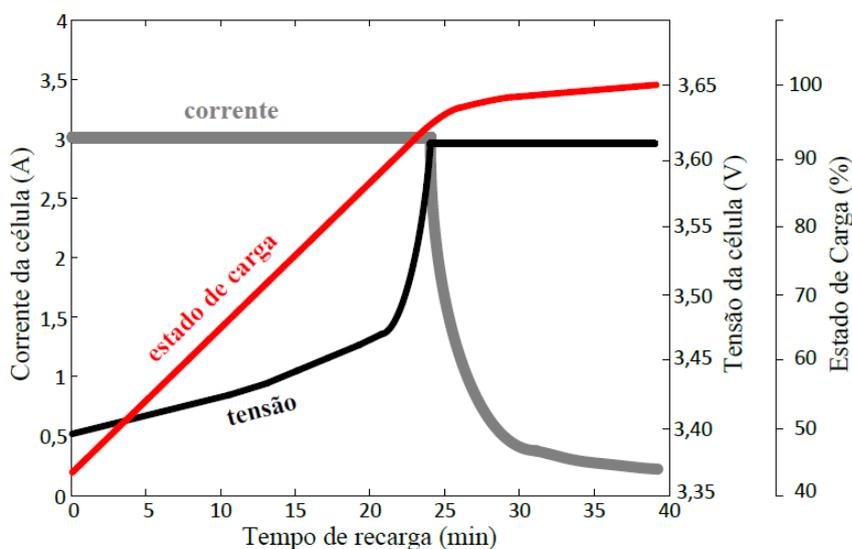
está sendo carregada. Método de carregamento no qual se deve manter a tensão entre os valores de segurança, para a correta carga nas baterias de íons de lítio. Carregar as baterias em altas correntes podem causar uma sobretemperatura e até mesmo vazamento do eletrólito de algumas baterias.

### 3.6.1.3 Carga por tensão e corrente constantes (CCCV)

Neste método de carregamento inicialmente é aplicada a corrente constante, podendo ser valores entre 0,2C e 0,7C dependendo do fabricante, corrente esta que é aplicada até que a tensão na célula não exceda o valor máximo recomendado. Em seguida o carregamento passa a ser por tensão constante até que a célula atinja sua capacidade total, como apresentado na Figura 10. A combinação dos dois métodos reduz o risco de sobrecarga e danos à bateria.

A tensão sempre deve ser monitorada para que não exceda o limite máximo indicado pelo fabricante, evitando assim danos as células da bateria.

Figura 10 – Curva de carga em bateria íon de lítio usando método CCCV.



Fonte: Extraído de Rodrigues (2014).

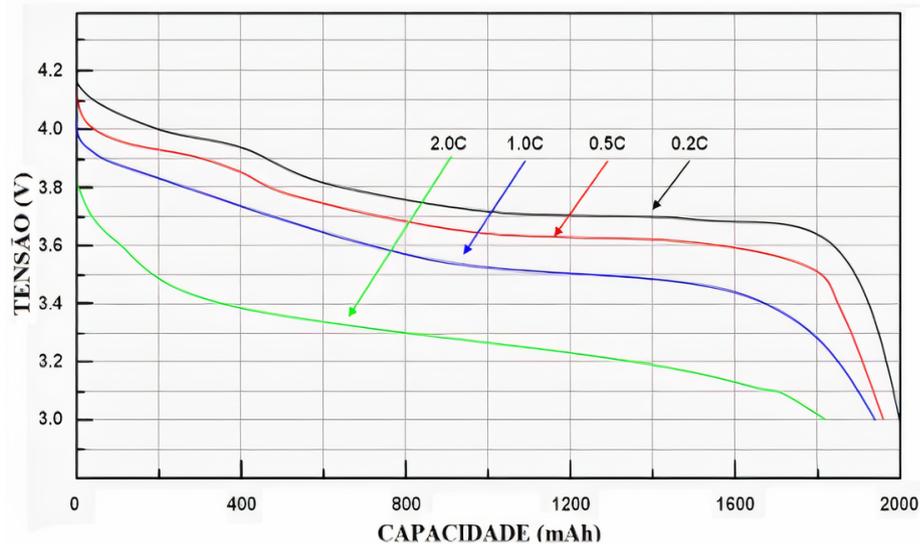
### 3.6.2 Descarga

As células de uma bateria de íons de lítio não devem ser descarregadas de forma excessiva. De modo geral, é aceitável que descarregue até 3V por célula, algumas podem chegar até a 2,5V. É necessário atentar-se para que não descarregue abaixo do limite inferior da célula para que não comprometa sua vida útil.

As primeiras baterias de íons de lítio eram consideradas limitadas a altas descargas. Atualmente, no mercado baterias que competem diretamente com as grandes baterias de chumbo e níquel.

As curvas de descargas das baterias são não lineares e de modelagem complexa e apresentam variação da tensão da bateria em função do tempo. Para distintas correntes de descarga, são obtidas curvas diferentes.

Figura 11 – Curvas de descarga em bateria íon de lítio para algumas taxas C.



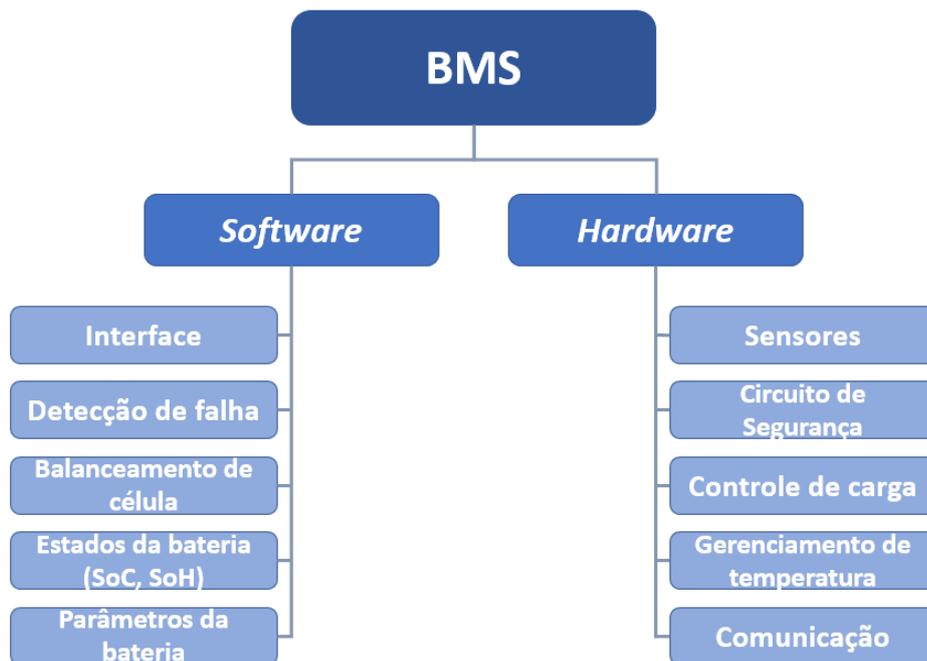
Fonte: Extraído de STA Eletronica .

O tempo de descarga de determinada bateria está diretamente relacionado a taxa de descarga a qual ela é submetida. O C representa a capacidade nominal da bateria. Na Figura 11 observa-se quatro curvas de descarga para a mesma bateria. O que difere é o múltiplo do valor de C, ou seja, quanto maior a taxa de descarga mais rapidamente a bateria se descarrega, atingindo o limiar de tensão mínima.

## 4 Sistema de Monitoramento de Baterias Íons de Lítio

Em virtude das baterias de íons de lítio terem um melhor desempenho na aplicação em VE's, deve se ter cuidado especial às condições de operação, a fim de que sempre funcionem na sua normalidade, aumentando sua vida útil e retardando seu envelhecimento (HANNAN et al., 2017). De acordo com Andrea (2010), não existe uma definição única para o BMS (*Battery Management System*). É qualquer sistema cuja tecnologia esteja voltada para cuidar de uma bateria, podendo incluir algumas funções como, monitoramento e proteção da bateria, estimar o estado de carga, maximizar seu desempenho e relatar usuários ou dispositivos externos. A disposição básica de um BMS é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Estrutura básica do BMS em VE's.



Fonte: Adaptado de Hannan et al. (2017).

O *hardware* do sistema é responsável por adquirir as variáveis tensão, corrente e temperatura, por meio de sensores. Deve ser capaz de fazer medições simultâneas, com intuito de ter melhor precisão nas estimativas.

O *software* monitora todas as variáveis adquiridas, faz o gerenciamento das proteções e alertas da bateria, comunica com sistemas periféricos e implementa estimativas ou algoritmos de balanceamento de células.

O balanceamento de células é de extrema importância para a maximização do uso da bateria e sua vida útil. Basicamente, é feito comparando as tensões de cada célula,

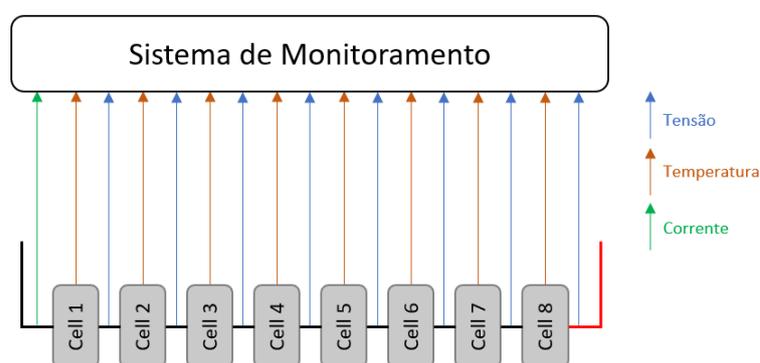
encontrando as células de maior e menor tensão. Se a diferença for maior que um valor pré definido, o carregamento é suspenso para que de alguma forma a célula que tenha maior tensão momentânea seja descarregada para um valor aceitável (CHENG et al., 2011).

Devido as células e prezando a segurança, um BMS voltado para íons de lítio deve evitar que uma célula exceda seu limite de tensão, impedir que a temperatura de cada célula não ultrapasse o limiar, que a tensão da célula não seja inferior ao limite de descarga e controlar a corrente de carga e descarga da célula. O sistema deve ser capaz de realizar estas ações, ou solicitar externamente que seja feito o controle (ANDREA, 2010).

Os estados da bateria estado de carga SoC (do inglês, *State of Charge*) e estado de saúde SoH (do inglês, *State of Health*) são essenciais para identificar as condições atuais da bateria. O SoC indica em porcentagem (0% a 100%) o quanto a bateria está carregada. O SoH é responsável por informar a condição atual de uma bateria em fornecer o desempenho específico se comparado com os dados de fábrica. Para esta medida é levada em comparação alguns fatores como taxa de alto descarga, tensão, resistência interna e aceitação de carga.

Com intuito de monitorar a bateria de íons de lítio, foi proposto o acompanhamento dos parâmetros de temperatura, tensão e corrente além do cálculo do estado de carga atual da bateria, que como enfatizado nos capítulos anteriores, são dados de extrema importância para o bom funcionamento destas baterias. Basicamente são três circuitos: i) monitoramento de temperatura; ii) monitoramento de tensão e iii) monitoramento de corrente. No circuito de temperatura o microcontrolador é utilizado para receber o sinal de falha. No circuito de tensão, o microcontrolador monitora os sinais de tensão das células e sinaliza a falha quando estiver fora da faixa de tensão aceitável. A estrutura simplificada do sistema de monitoramento proposto é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Estrutura do protótipo de monitoramento.



Fonte: Autor.

Para aquisição da corrente da bateria, foi sugerido a utilização de um sensor não invasivo e de um circuito de condicionamento de sinais para que a leitura de corrente fosse enviada para o microcontrolador. A partir da aquisição de corrente é possível acompanhar a carga, descarga e realizar o cálculo do estado de carga da bateria.

Este capítulo expõe o sistema proposto para monitorar a tensão, temperatura e o estado de carga e apresenta alguns resultados obtidos.

#### 4.0.1 Célula $LiFePO_4$

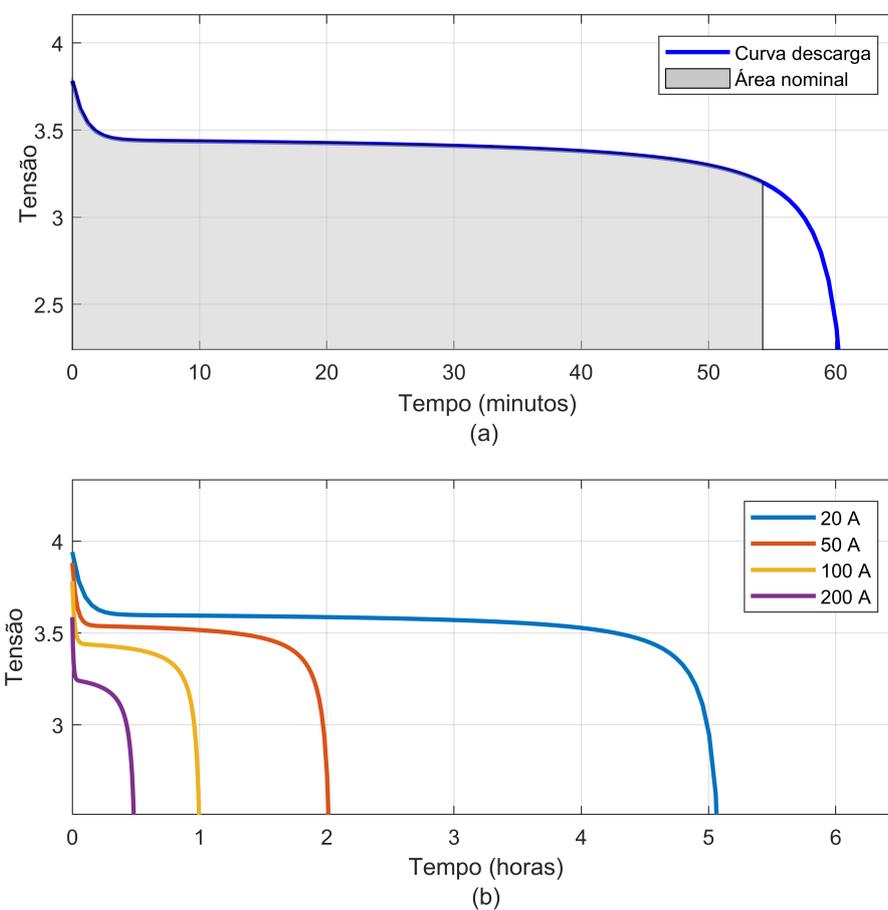
A célula escolhida para estudos foi a LFP-G100AH, uma tecnologia Lítio-Ferro-Fosfato ( $LiFePO_4$ ), as características básicas desta célula é apresentada na Tabela 2 e seu documento de especificações é apresentado no anexo A. Os limites de tensões e temperatura de operação são extraídos da especificações desta célula.

Tabela 2 – Características da célula LFP-G100AH.

Tensão Nominal	3,2V
Capacidade Nominal	100Ah
Temperatura Operacional	-20°C a 65°C
Resistência Interna	0,0018 Ohms

A curva de descarga característica desta bateria é apresentada na Figura 14, gráfico obtido através da parametrização do bloco *Battery* do *Simulink* utilizando as especificações da bateria.

Figura 14 – Característica de Descarga Célula LFP.

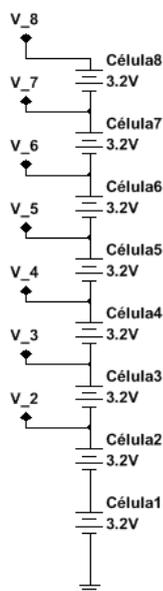


Legenda: (a) descarga para 1C e (b) outros valores de descarga.

Fonte: Autor.

A Figura 14 (a) ilustra a curva de descarga pra corrente nominal 100A (1C). As curvas de tensão para os valores de corrente: 0,2C, 0,5C, 1C e 2C são apresentadas pela Figura 14 (b). Observa-se a redução do tempo de descarga da célula para valores maiores de corrente.

Figura 15 – Conexão proposta das células.



Fonte: Autor.

Para implementação do circuito de monitoramento supõe-se que a bateria é composta por 8 células conectadas em série (8S), como na Figura 15. Os circuitos e simulações apresentados serão embasados nesta configuração.

#### 4.0.2 Microcontrolador

O *hardware* utilizado para a comunicação entre bateria, circuito de monitoramento e usuário foi o *Arduíno MEGA 2560*. Suas características são descritas na Tabela 3.

Figura 16 – Arduíno MEGA 2560.



Fonte: Arduino.

Este foi escolhido devido a disponibilidade de ter 15 pinos de saída de sinal modulado por largura de pulso (PWM). Visto que no circuito de tensão são utilizados 7 destes pinos.

Os pinos 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 do Arduíno MEGA2560 foram ajustados para que a frequência do PWM seja de 31,374 kHz, ajuste feito com auxílio da configuração dos

Tabela 3 – Características do hardware Arduino MEGA 2560.

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Pinos digitais I/O	54 (15 pinos configuráveis para PWM)
Entradas A/D	16 (10 bits)
Corrente DC por pino	40mA
Corrente DC para pinos de 3,3V	50mA
Memoria Flash	256KB com 8KB usado pelo bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4KB
Velocidade de Clock	16MHz

temporizadores do microcontrolador. O que difere cada pino é o ajuste do *duty cycle*, este que é feito a partir da análise da posição de cada célula.

## 4.1 Circuito de monitoramento de temperatura

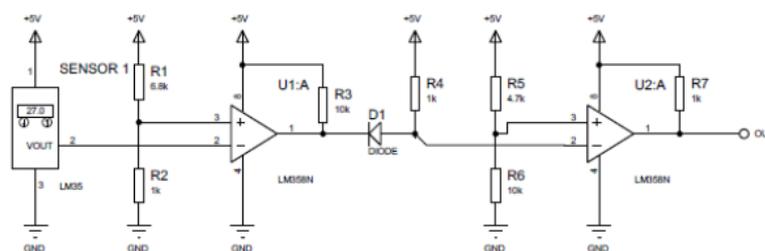
Com objetivo de monitorar a temperatura, o circuito analógico é constituído basicamente por sensores, amplificadores operacionais e diodos, apresentado na Figura B. O circuito apresenta o monitoramento de 8 células simultâneas. O circuito que monitora simultaneamente oito células, foi elaborado para que um sinal de erro seja enviado ao Arduíno quando qualquer uma das células superar  $65^{\circ}C$ .

O sensor de temperatura utilizado é o LM35, fabricado pela *Texas Instruments*, apresenta uma saída linear de tensão de acordo com a temperatura. Possui uma faixa de temperatura de medida de  $-55^{\circ}C$  a  $150^{\circ}C$ , cujo sua resolução é de  $10mV/^{\circ}C$ , informações retiradas do seu próprio *datasheet*. Se dispõe de 3 pinos, sendo pino 1 a alimentação, pino 2 tensão de resposta à temperatura e pino 3 o GND.

Amplificadores operacionais são utilizados na configuração de comparadores. O circuito integrado utilizado é o LM358, que é constituído por dois amplificadores operacionais.

Analisando o funcionamento do circuito para uma célula, Figura 17, o sensor tem como saída um valor de tensão correlacionando a temperatura. Esta tensão é comparada a uma referência constante através de um amplificador operacional.

Figura 17 – Circuito para monitorar uma célula.

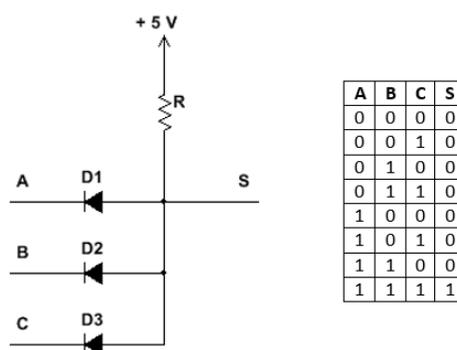


Fonte: Autor.

Se fez necessário a implementação de um circuito de condicionamento de sinais, cujo objetivo é adequar valores de tensões do circuito para utilização das entradas analógicas do microcontrolador.

A configuração de diodos implementada no circuito é disposta com o mesmo objetivo funcional de uma porta lógica AND, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Porta lógica AND - configuração de diodos.



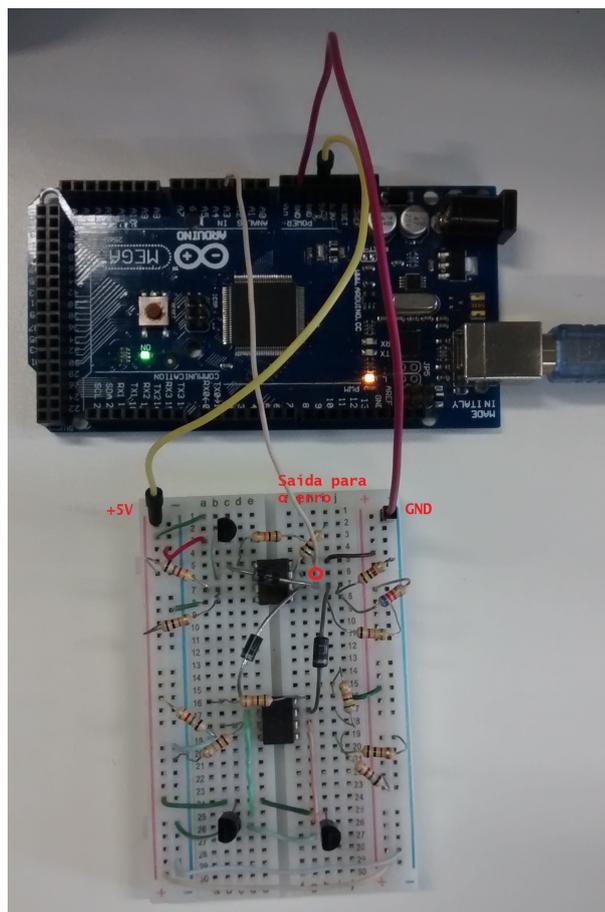
Fonte: Autor.

#### 4.1.1 Teste de monitoramento temperatura

Como o circuito de monitoramento de temperatura de cada célula é individual e independe dos demais, para simplificar o teste em bancada, o circuito proposto na Figura B foi reduzido para monitorar apenas 3 células. Para verificar seu funcionamento, foi adotado um mecanismo próprio para aquecer os sensores e com isso simular uma elevação de temperatura.

A Figura 19 apresenta a montagem do teste, onde é possível observar o circuito de monitoramento de temperatura conectado ao Arduino MEGA2560. A saída do circuito é conectada a entrada analógica do microcontrolador (pino A3).

Figura 19 – Montagem do circuito de monitoramento de temperatura para o teste.

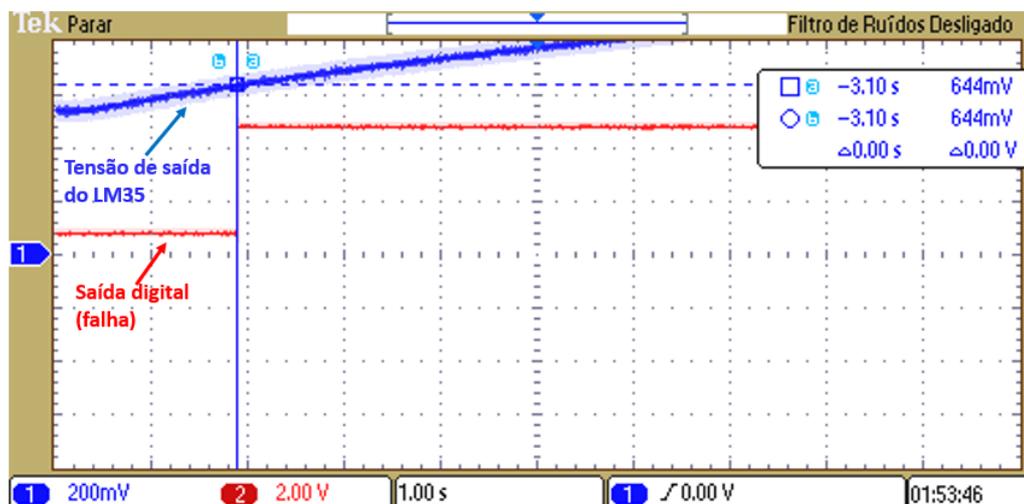


Fonte: Autor.

A fim de constatar o funcionamento do circuito, um ou mais sensores LM35 deveriam ser aquecidos para que a temperatura atingisse o valor limite.

Com auxílio do osciloscópio, o canal 1 (azul) foi conectado à saída de um dos sensores e o canal 2 (vermelho) conectado à saída do circuito, ilustrados na Figura 20.

Figura 20 – Teste de superaquecimento da célula.



Fonte: Autor.

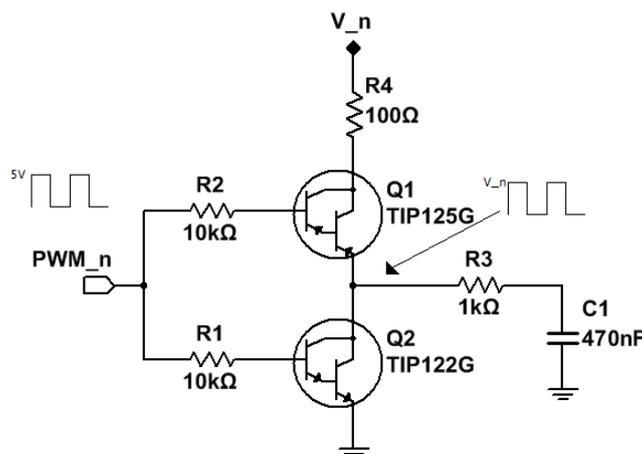
Na cor azul observa-se a temperatura da célula, e em vermelho o degrau gerado a partir do limite de temperatura determinado. O valor medido no teste foi de 644mV, que de acordo com o sensor LM35 utilizado, esta tensão é equivalente a  $64,4^{\circ}\text{C}$ . Sendo assim, quando atingida esta temperatura, o circuito é capaz de acionar um sinal de falha informando que há um superaquecimento em uma das células.

## 4.2 Circuito de monitoramento de tensão

Com a intuito de monitorar a tensão de cada célula, inicialmente foi proposto a elaboração do circuito destacado na Figura 21. Pela especificação da célula, a falha deve ocorrer em duas situações, quando a tensão da bateria for menor que 2,8V e/ou maior que 3,8V. Portanto as ações ocorrem a partir destas especificações.

O circuito é composto por dois transistores, PNP(Q1) e NPN(Q2) conectados na configuração de um amplificador classe D. Esta topologia funciona de modo que as chaves semicondutoras sejam complementares, ou seja, quando Q1 estiver em corte Q2 estará saturado e vice-versa. Deste modo quando aplicado o sinal PWM nas bases dos transistores, o sinal resultante entre os transistores é o mesmo PWM, com o amplitude igual a tensão aplicada no coletor do transistor Q1.

Figura 21 – Circuito para medir a tensão de uma das células.



Fonte: Autor.

Na Figura 21 onde  $V_n$  é a tensão na célula, o número da célula é dado por  $n = 2,3,\dots,8$  (ver Figura 15) e a entrada PWM é a modulação por largura de pulsos gerada pelo microcontrolador.

O circuito proposto, em comparação a um circuito puramente resistivo (divisor de tensão) por exemplo, é mais vantajoso no sentido de que o condicionamento de sinal para o microcontrolador pode ser feito simplesmente com a mudança no *duty cycle* do PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*), não necessitando de uma reconfiguração do circuito.

A modulação por largura de pulsos PWM é uma técnica utilizada em diversas áreas da eletrônica, tem como objetivo a variação do valor médio de uma onda periódica. Funciona de modo que a frequência e a amplitude da onda quadrada se mantenham fixas, e que ocorra uma variação no tempo em que a onda fique em nível lógico alto, este tempo é chamado de *duty cycle*, que é o ciclo ativo da forma de onda (HART, 2016).

Por definição, um filtro RC passa baixas é assim denominado porque ele passa as baixas frequências e atenua as altas (HOROWITZ; HILL, 2017). O filtro utilizado no circuito se faz necessário para coletar o valor médio da tensão presente na conexão entre os transistores, para que esta tensão possa ser analisada no microcontrolador. Para a especificação do filtro passa baixas, a frequência de corte do filtro é:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{(2\pi)(1000)(470n)} \approx 339Hz, \quad (4.1)$$

onde  $f_c$  é a frequência de corte do filtro,  $R$  o resistor em *Ohms* e  $C$  o capacitor em *Farad* do filtro projetado.

### 4.2.1 Teste de monitoramento de tensão

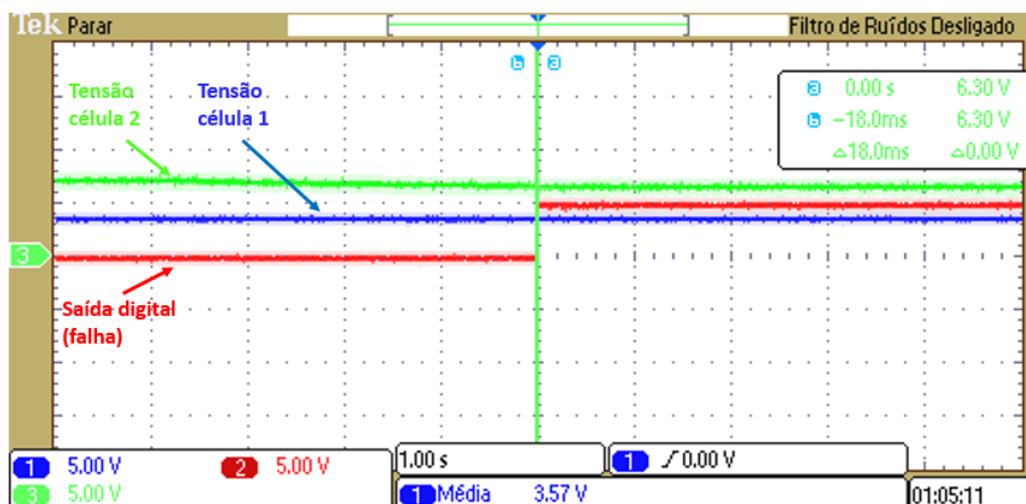
Optou-se, no desenvolvimento dos ensaios, pela utilização de uma fonte de alimentação de corrente contínua para simular a tensão da célula. Com o propósito de acompanhar a análise de tensão das células, a execução do circuito de monitoramento de tensão foi utilizando novamente uma *protoborad*. Para realização do teste, foi definido analisar o comportamento em apenas uma das células, adotou-se então a análise de tensão na segunda célula conectada em série.

Foi utilizado o pino 5 (pino PWM) do MEGA2560 ajuste de *duty cycle* em 0,5 (50%). O pino 52 foi configurado para sinalização de falha, assim que a tensão da célula atingisse os limiares ajustados, 2,8V para subtensão e 3,8V para sobretensão, um sinal de 5V é gerado.

Os resultados para o circuito de monitoramento de tensão são apresentados nas Figuras 22 e 23, respectivamente para o caso de subtensão e sobretensão da célula.

De acordo com a especificação da célula, é recomendado que a tensão máxima não ultrapasse 3,8V e não seja menor que 2,8V. As Figuras 22 e 23, mostram os resultados nas cores azul, vermelha e verde que representam respectivamente a tensão da primeira célula, sinal digital que representa a falha e a tensão medida na segunda célula.

Figura 22 – Teste de subtensão na célula.

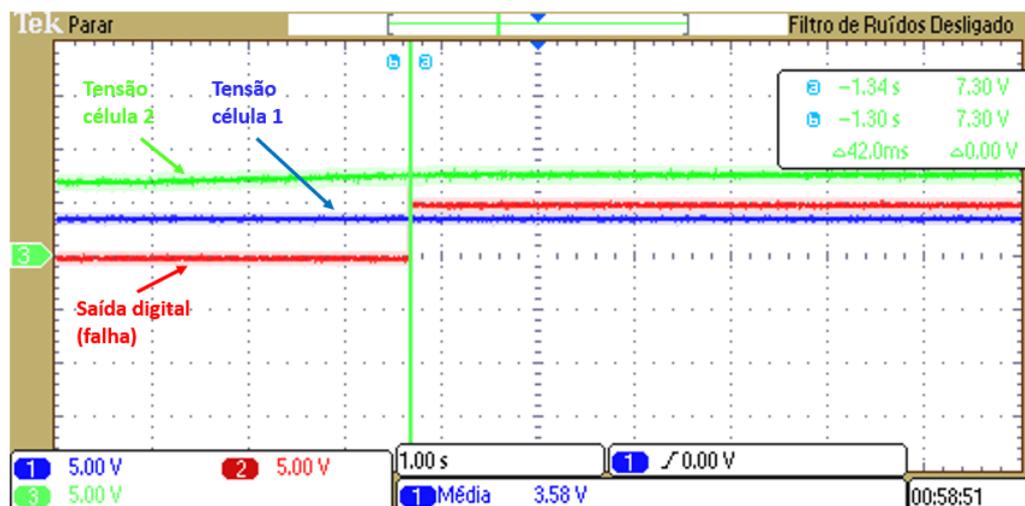


Fonte: Autor.

Para este teste, foi escolhido manter a primeira célula com 3,57V. Diante do resultado da Figura 22 pode-se observar que o sinal de erro ocorre quando a tensão referente à segunda célula atingiu um valor de 6,30V. Logo, a diferença entre as tensões das duas células foi de 2,73V, valor este abaixo do limite estabelecido de 2,80V.

Para o ensaio de sobretensão, a primeira célula aparece com valor de tensão de 3,58V, a falha é sinalizada quando a tensão vista na segunda célula é de 7,30V, portanto o sistema atuou quando a tensão da segunda célula era de 3,72V, resultado apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Teste de sobretensão na célula.



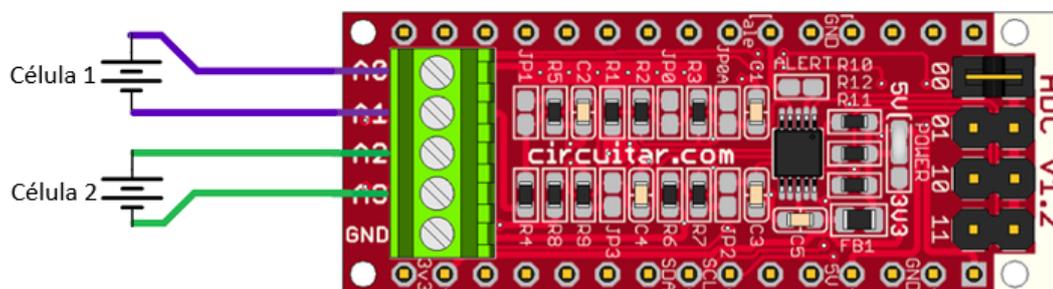
Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Monitoramento de tensão

O circuito de monitoramento de tensão descrito na Figura 21 e testado na Seção 4.2.1 apresenta o impasse que dificultaria na elaboração física do protótipo, sendo ele o elevado consumo de energia devido o uso de sete transistores de potência.

Uma alternativa para efetuar a aquisição de tensão das células da bateria é adotar um Conversor Analógico Digital (ADC) diferencial. Desta forma tornaria-se capaz de utilizar as entradas analógicas comparando-as uma com as outras, podendo assim identificar células que estariam com suas tensões fora da faixa segura de operação, obtendo também uma maior precisão nas aquisições dos valores de tensão de cada célula.

Figura 24 – Conversor Analógico Digital para duas células.



Fonte: Adaptado de Circuitar (2018).

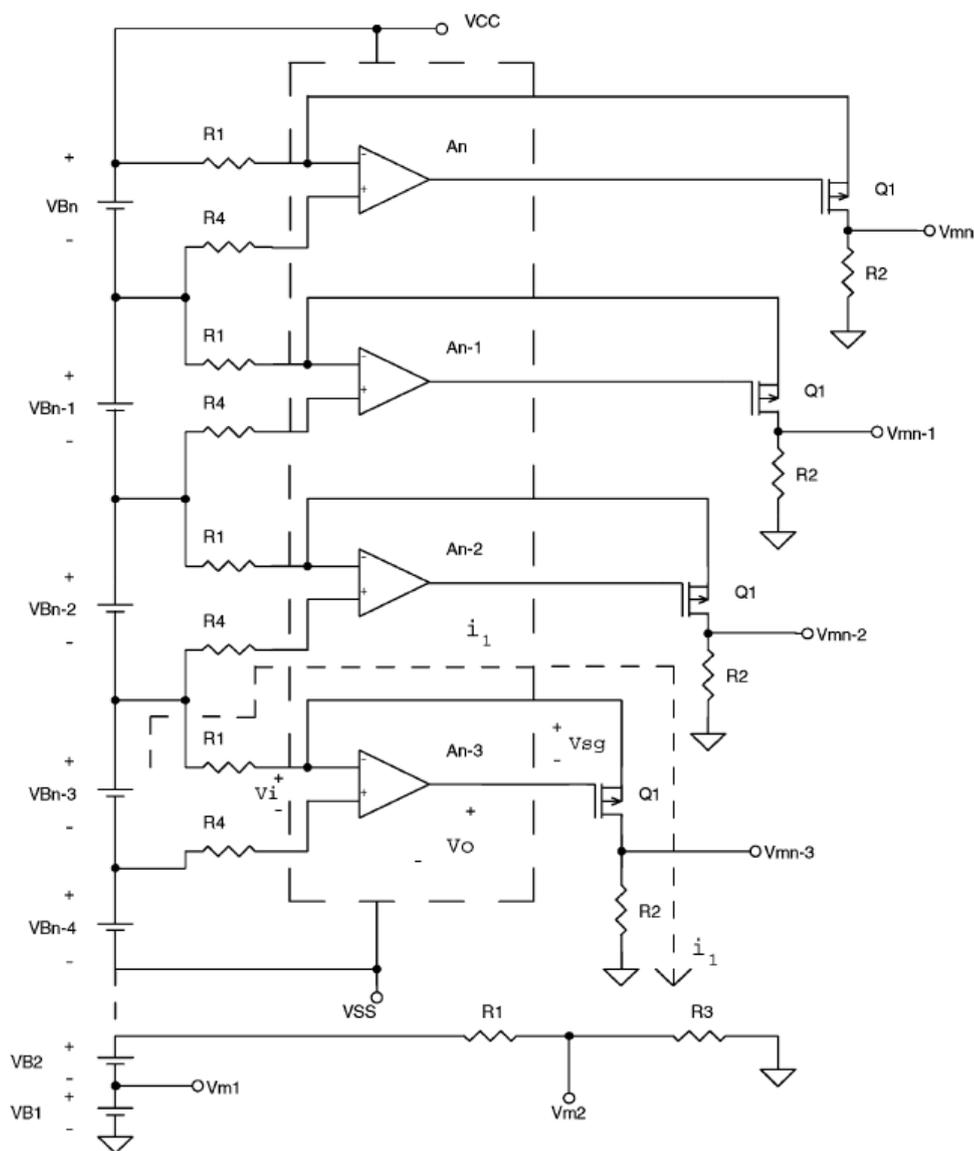
Com esta configuração é possível converter o sinal diferencial, isto é, a diferença de potencial entre dois pontos, similar ao que acontece se realizada medição com um multímetro. Para a aplicação proposta se faz necessário a utilização de quatro módulos adicionais de ADC diferencial, para que possa ser possível atender as oito células.

Além do monitoramento realizado por PWM ou por meio de conversores ADC, pode-se utilizar também amplificadores operacionais diferenciais (FRIVALDSKY et al.,

2020). Quando utilizando amplificadores operacionais, a saída é a diferença entre os valores dos pinos inversor e não inversor. Wang e Stuart (2002) apresentam um circuito básico para realização de medidas em células (Figura 25) conectadas em série utilizando amplificadores operacionais, é possível realizar a adaptação do circuito para aplicação no protótipo proposto utilizando o CI LM224.

Para se medir a tensão de oito células seriam necessários sete amplificadores operacionais.

Figura 25 – Circuito para medir tensões das células.



Fonte: Extraído de Wang e Stuart (2002)

### 4.3 Estado de Carga

O estado de carga de uma bateria é a porcentagem da capacidade atual em relação a sua capacidade total. Saber a quantidade de energia que uma bateria ainda possui, dá

ao usuário a informação necessária de quanto tempo a bateria tem de funcionamento antes de precisar de recarga. Com a estimativa do SoC (*State of Charge*), também é possível avaliar a confiabilidade da bateria.

Em um VEH, por exemplo, o SoC pode ter a função de determinar em qual momento o motor de combustão interna deve ser ligado e desligado (XING et al., 2011).

A estimativa do SoC de uma bateria não é simples, pelo fato de envolver os parâmetros de tensão, corrente, temperatura, características da bateria e efeitos não lineares relacionados à descarga (CHENG et al., 2011). Devido a fatores como reações químicas da bateria e de cargas externas, a capacidade máxima da bateria diminui gradativamente ao longo do tempo (HANNAN et al., 2017; XING et al., 2011).

Por definição matemática, para se estimar o SoC, é necessária a integração da corrente atual em relação a capacidade nominal da bateria. Como pode ser observado na equação 4.2 (HANNAN et al., 2017).

$$SoC = 1 - \frac{\int i dt}{C_n} \quad (\%) \quad (4.2)$$

onde  $i$  é a corrente da bateria;  $C_n$  é a capacidade nominal e  $t$  é o tempo.

Hannan et al. (2017), Cheng et al. (2011) citam que há formas diferentes para obter o SoC, como medição da tensão em circuito aberto (OCV), medição de impedância, contagem de Coulomb, redes neurais, dentre outros métodos.

### 4.3.1 Contagem de Coulomb

Método que de forma direta estima o SoC integrando a corrente de entrada e saída da bateria (ILLERA, 2014). Ou seja, a carga transferida para dentro ou para fora da célula é obtida acumulando-se a drenagem de corrente relacionada ao tempo (XING et al., 2011). É o método mais comum para estimar o SoC de baterias (HANNAN et al., 2017).

De forma geral, este método pode ser relacionado pela equação 4.3 abaixo.

$$SoC = SoC_0 + \frac{1}{C_n} \int i dt \quad (\%), \quad (4.3)$$

onde  $i$  é a corrente da bateria,  $SoC_0$  é o estado de carga inicial,  $C_n$  é a capacidade nominal e  $t$  é o tempo.

Esta técnica de estimativa apresenta algumas limitações, como medições imprecisas de corrente e erro de SoC inicial, necessitando assim ser recalibrado para que haja sucesso na estimativa.

### 4.3.2 OCV (*Open Circuit Voltage*)

Outro método comum é o de tensão em circuito aberto, que se baseia na estimativa do SoC relacionando-o com a tensão nos terminais da célula quando não há carga conectada,

ou seja, quando não há circulação de corrente. Uma das principais desvantagens é que se faz necessário grandes quantidades de dados, demandando um tempo maior (HANNAN et al., 2017). Mesmo podendo ser muito preciso mas como necessita de um certo tempo de equilíbrio, Rivera-Barrera, Munoz-Galeano e Sarmiento-Maldonado (2017) afirmam que o método OCV não deve ser aplicado em sistemas para o estimar o SoC em tempo real.

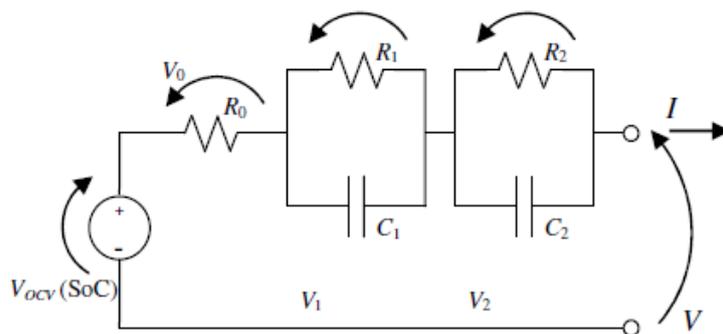
### 4.3.3 Modelo Base

A modelagem de uma bateria tem um expressivo impacto na obtenção do estado de carga. Devido as suas complicadas características internas.

Utilizando a relação entre a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e o próprio estado de carga (SoC) é possível obter a estimativa atual do SoC. Para que isso ocorra é necessário conhecer o comportamento do bateria íon de lítio..

De acordo com Codeca, Savaresi e Rizzoni (2008) é possível realizar a modelagem de uma célula de íon de lítio a partir do circuito apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Modelo genérico célula íon de lítio.



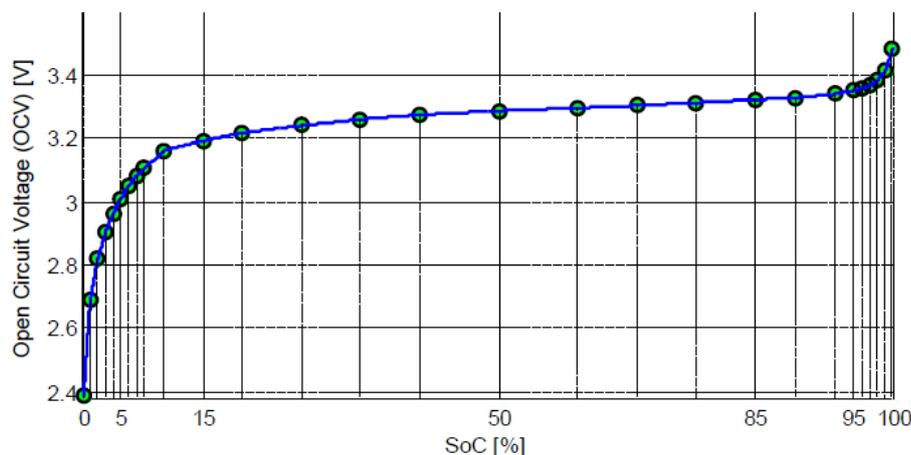
Fonte: Extraído de Codeca, Savaresi e Rizzoni (2008).

Nesta figura  $V_{oc}(SOC)$  representa a tensão da célula em função do SoC,  $V$  e  $I$  são a tensão e corrente medidos da célula,  $R_0$  representa a resistência interna da célula e a configuração paralelo/série de  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  e  $C_2$  equivale às características dinâmicas da célula.

Pelo modelo apresentado na Figura 26, pode-se extrair uma equação utilizando transformada de Laplace:

$$V = V_{OCV}(SoC) - \left( R_0 + \frac{R_1}{1 + sR_1C_1} + \frac{R_2}{1 + sR_2C_2} \right) I \quad (4.4)$$

A estimativa do estado de carga é baseada na relação tensão em circuito aberto e SoC. A Figura 27 apresenta um exemplo desta relação tensão circuito aberto e SoC de uma célula de íon de lítio fosfato.

Figura 27 – Célula LFP relação  $V_{OCV} \times SoC$ .

Fonte: Extraído de Codecà, Savaresi e Manzoni (2009).

#### 4.3.4 Algoritmos de estimativa de carga

Em algumas literaturas também chamados de métodos indiretos, estes necessitam de um modelo da bateria para reproduzir as características da bateria real e prever seu comportamento diante de várias condições (RIVERA-BARRERA; MUNOZ-GALEANO; SARMIENTO-MALDONADO, 2017).

Técnicas como filtragem de Kalman, lógica *Fuzzy*, redes neurais e outros algoritmos, são utilizadas para melhorar a eficiência na aquisição do SoC da bateria.

O Filtro de Kalman é uma técnica estatística, utilizada para estimar o SoC, avaliando a dinâmica do sistema, a partir da modelagem do processo. Este método filtra variáveis do processo que são consideradas imprecisas (HANNAN et al., 2017). Sua operação é por meio da antecipação do novo estado e da incerteza, sendo corrigido com uma nova medição.

As equações são obtidas a partir do espaço de estados, onde há comparações nos dados de entrada medidos e na saída (HANNAN et al., 2017; CHENG et al., 2011).

De acordo com Lu et al. (2013), Rivera-Barrera, Munoz-Galeano e Sarmiento-Maldonado (2017), a aplicação da lógica *Fuzzy* para estimar o estado de carga, é dada pelo fato de que o método é capaz de representar um modelo complexo com auxílio de um treinamento para os dados. O princípio de funcionamento da técnica pode ser ordenado em quatro processos: criação de regras para o processo de entrada e saída (fuzzificação), associação de funções para relacionar entrada e saída, raciocínio e a tradução da regras criadas (defuzzificação) (HANNAN et al., 2017). Apesar da lógica *Fuzzy* ser capaz de prever um modelo, necessita de um alto custo computacional.

A utilização de redes neurais no processo de determinar o SoC ocorre pelo fato de poder relacionar os dados de entrada e saída a partir de uma rede composta por nós. É necessário que a rede seja treinada para se relacionar com o SoC. A vantagem da utilização de redes neurais é que não há necessidade de conhecer os parâmetros da estrutura interna

da bateria e nem o SoC inicial. É exigido um elevado armazenamento de memória para tratar os dados (HANNAN et al., 2017).

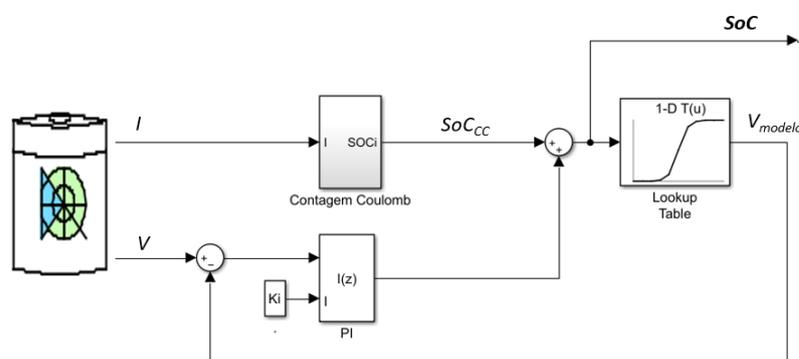
### 4.3.5 Estado de carga implementado

Utilizando a plataforma *Simulink* foi implementado um circuito capaz de realizar o cálculo do estado de carga (SoC) do modelo da bateria proposto. O circuito é composto pela combinação de dois métodos, Contagem Coulomb e o Modelo Base. Em resumo o cálculo principal é realizado pela Contagem Coulomb e é corrigido por um controle em malha fechada, comparando os valores medidos com o modelo da bateria.

Como mencionado no capítulo 4 deste presente trabalho, o método de Contagem Coulomb possui como uma de suas limitações a dificuldade de uma assertividade no valor do  $SoC_o$  (Estado de carga inicial). Devido a isso foi projetada a combinação entre Contagem Coulomb e Modelo Base, para que fosse possível realizar o cálculo do estado de carga de forma mais precisa.

A Figura 28 apresenta de forma resumida o circuito implementado via Simulink para cálculo do estado de carga.

Figura 28 – Circuito implementado o para cálculo do SoC.



Fonte: Autor.

A bateria é representada pelo bloco *Battery*, bloco este que possibilita a implementação de diversos tipos de baterias recarregáveis. Foram inseridas as especificações da folha de dados da célula LFP-G100AH (Anexo A), para que o modelo seja capaz de simular a dinâmica de carga e descarga da célula escolhida.

Com o auxílio de uma fonte de corrente controlada foram adotadas cargas e descargas lineares para as simulações, para carga  $I < 0$  e descarga  $I > 0$ .

A Contagem Coulomb foi implementada com o bloco *Discrete Time Integrator* utilizando o método *Backward Euler* com o intuito de representar equação 4.3.

A expressão na saída para esta configuração do bloco é dada pela equação:

$$y_n = y_{n-1} + K * T * u_n, \quad (4.5)$$

onde  $y_n$  é a saída atual,  $y_{n-1}$  é a saída no instante anterior,  $K$  é definido como ganho de entrada,  $T$  tempo amostral e  $u_n$  é o sinal de entrada que será integrado.

O método foi praticado adotando  $y_n$  como  $SoC$ ,  $y_{n-1}$  sendo  $SoC_o$  e  $(K * T * u_n)$  tornando-se  $\frac{1}{C_n} \int idt$ .

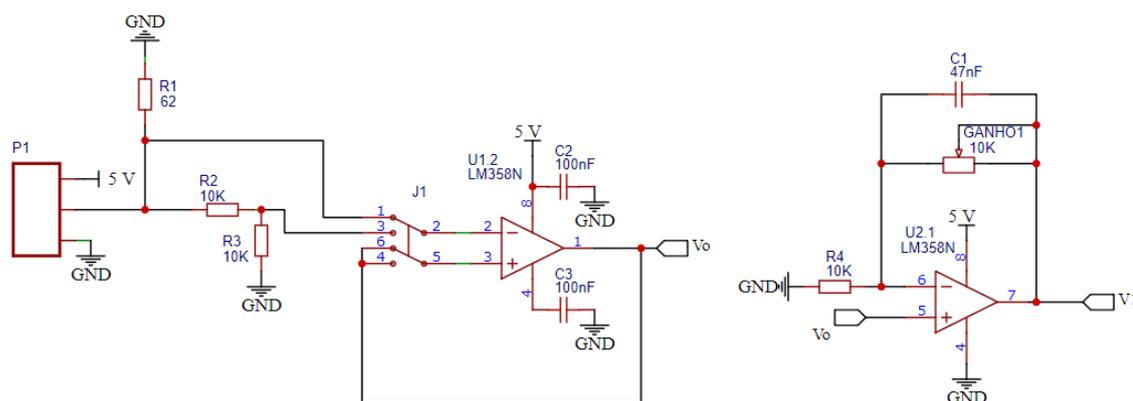
Utilizando o bloco *Lookup Table* foi possível modelar a bateria com o intuito de que funcione como modelo comparativo para os valores associados de tensão e SoC nos instantes de tempo simulados. A inserção dos dados neste bloco foi dada a partir de uma simulação paralela do modelo da bateria escolhida, coletando dados de tensão e estado de carga para casos distintos de carga e descarga. Criando assim tabelas com dados que sirvam como comparativos com as medidas nos instantes de tempo simulados. Para a carga da bateria foram realizadas simulações para valores de corrente em 20A (0,2C) e 50A (0,5C) e para descarga os valores escolhidos foram 50A (0,5C) e 100A (1C).

Com o bloco *PI Controller* foi implementado um controlador para que fosse possível a aplicação da malha fechada para correção dos valores medidos de tensão com o real. O ganho  $K_I$  foi obtido de modo empírico, devido não ter sido possível a aquisição das características internas da bateria estudada, este valor foi configurado em  $K_I = 0,3$ .

#### 4.3.5.1 Circuito de monitoramento de corrente

Com a finalidade de realizar medições instantâneas de corrente da bateria, foi implementado o circuito da Figura 29. O circuito de condicionamento de sinais se faz necessário para ajuste no valor de tensão para entrada analógica no microcontrolador.

Figura 29 – Circuito para medir a corrente da bateria.



Fonte: Autor.

É possível adaptar o circuito de acordo com o sensor de corrente que será utilizado, alterando apenas o *switch*. Se a resposta do sensor de corrente seja em tensão, utilizar J1 em 3-2 e 4-5. Caso a saída seja em corrente, utilizar J1 em 1-2 e 6-5.

Figura 30 – Sensor de corrente HKS2032.



Fonte: Extraído de YHDC (2019).

Inicialmente pretende-se fazer o uso do sensor de corrente de efeito hall HKS2032, fabricado pela YHDC, este que sua medição é baseada no princípio do acoplamento das linhas de campo eletromagnético em torno do condutor, correlacionando o fluxo magnético a corrente elétrica.

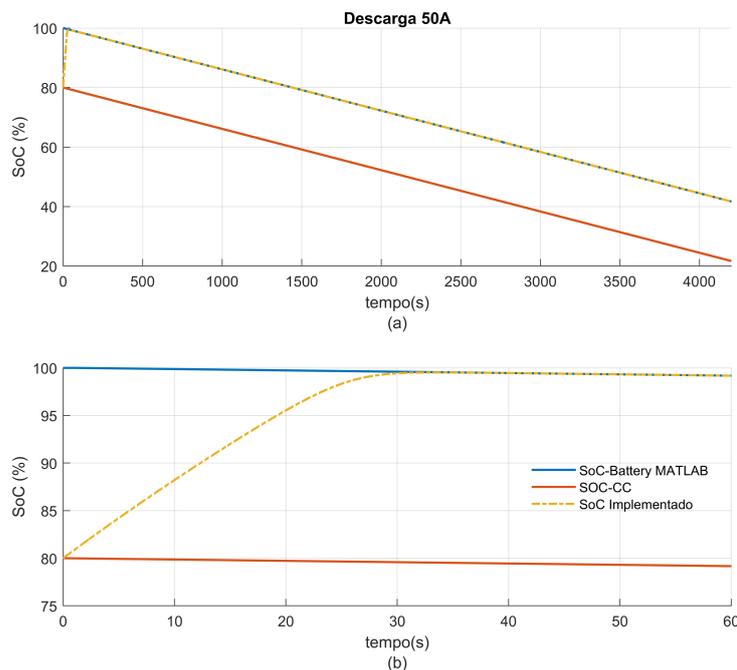
Este componente possui saída em tensão, que são enviados diretamente ao microcontrolador. Em anexo C, se encontra a folha de dados do sensor.

#### 4.3.6 Resultados para o cálculo de estado de carga implementado

Como referência de resultados esperados foram utilizadas as curvas obtidas do próprio bloco *Battery* do *Simulink* e comparadas com o cálculo implementado. Os gráficos apresentados nesta seção foram extraídos a partir do *MATLAB*.

Nestes gráficos são exibidos os resultados obtidos para alguns dos testes realizados para carga e descarga com correntes e estados de cargas iniciais variados.

Figura 31 – Simulação para descarga de 50A da bateria.



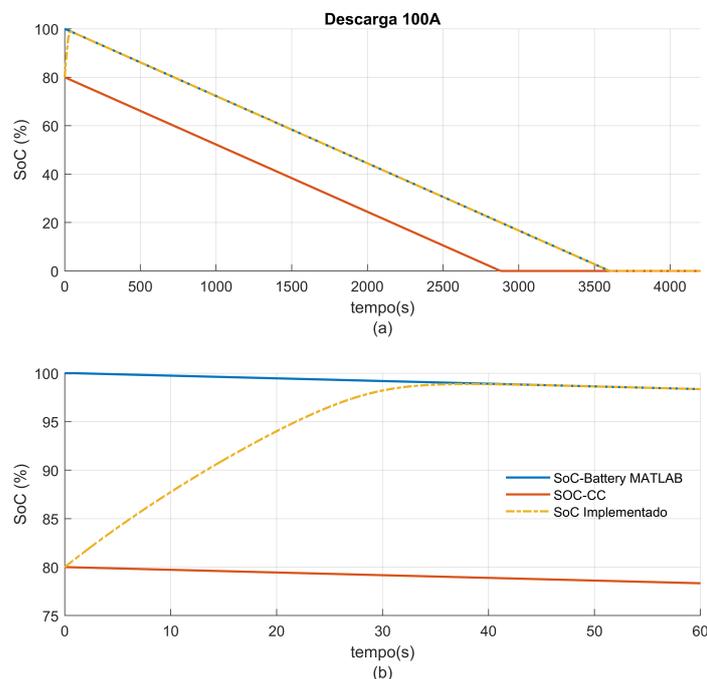
Legenda: (a) estado de carga a 50A e (b) ampliação no intervalo de 0 a 60s.

Fonte: Autor.

O cálculo do estado de carga implementado via *Simulink* é apresentado em amarelo, o estado de carga adotado como referência (*Battery Model - Simulink*) em azul, e em laranja o estado de carga pelo método de Contagem Coulomb.

Para este resultado apresentado pela Figura 31, foram adotados  $SoC_o = 80\%$ ,  $SoC_{real} = 100\%$  e  $I_{descarga} = 50A$ . É possível observar que como o estado de carga inicial ( $SoC_o$ ) utilizado foi distinto ao do  $SoC_{real}$ , o resultado para o cálculo do SoC por Contagem Coulomb não é satisfatório. Observa-se a efetividade da correção do cálculo quando a curva em amarelo tende a convergir com a curva do  $SoC_{real}$ , em azul.

Figura 32 – Simulação para descarga de 100A da bateria.



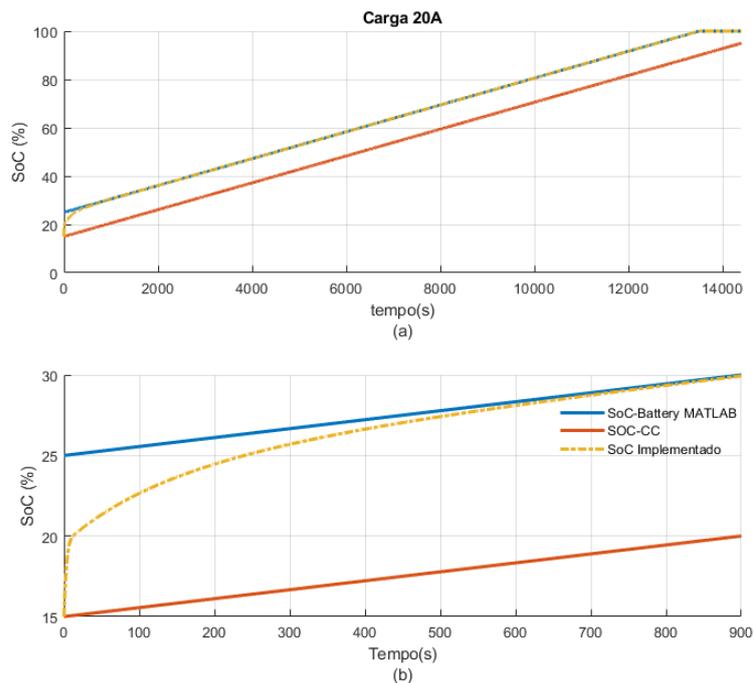
Legenda: (a) estado de carga a 100A e (b) ampliação no intervalo de 0 a 60s.

Fonte: Autor.

Para este caso, da Figura 32, foram adotados  $SoC_o = 80\%$ ,  $SoC_{real} = 100\%$  e  $I_{descarga} = 100A$ , nota-se então um comportamento similar ao do caso anterior. Como o  $SoC_o$  novamente é diferente ao  $SoC_{real}$ , o cálculo do estado de carga pelo método de Contagem Coulomb não se torna satisfatório. Analisando então a curva gerada para o cálculo implementado (em amarelo), percebe-se que em aproximadamente 35 segundos o  $SoC$  calculado atingiu o  $SoC_{real}$ .

Também foram realizadas simulações para a carga da bateria. Nas Figuras 33 e 34, em ambos os casos foram adotados  $SoC_o = 15\%$  e  $SoC_{real} = 25\%$ , uma com corrente  $I_{carga} = 20A$  e outra  $I_{carga} = 50A$ . Similar ao que ocorreu para a descarga, a simulação se mostrou eficiente também para a carga da bateria.

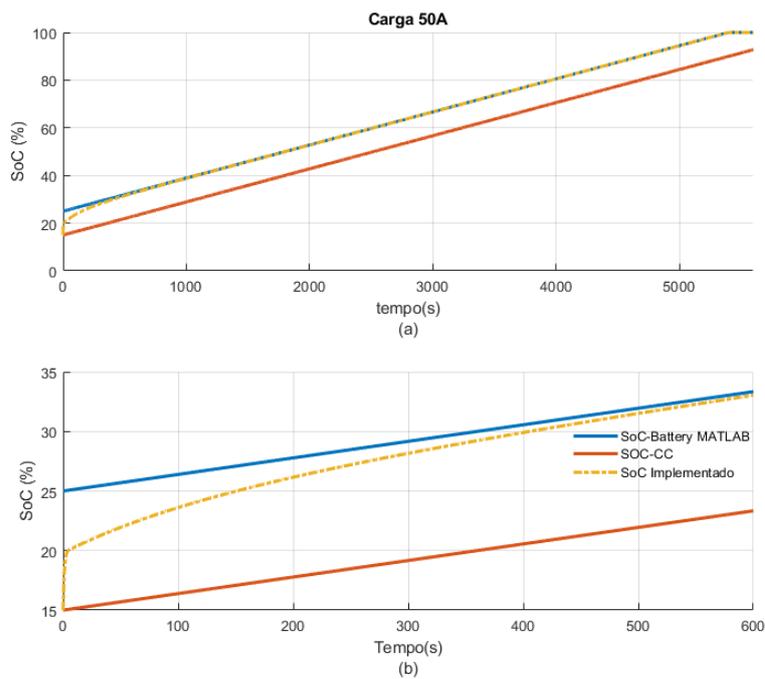
Figura 33 – Simulação para carga de 20A da bateria.



Legenda: (a) estado de carga a 20A e (b) ampliação no intervalo de 0 a 900s.

Fonte: Autor.

Figura 34 – Simulação para carga de 50A da bateria.



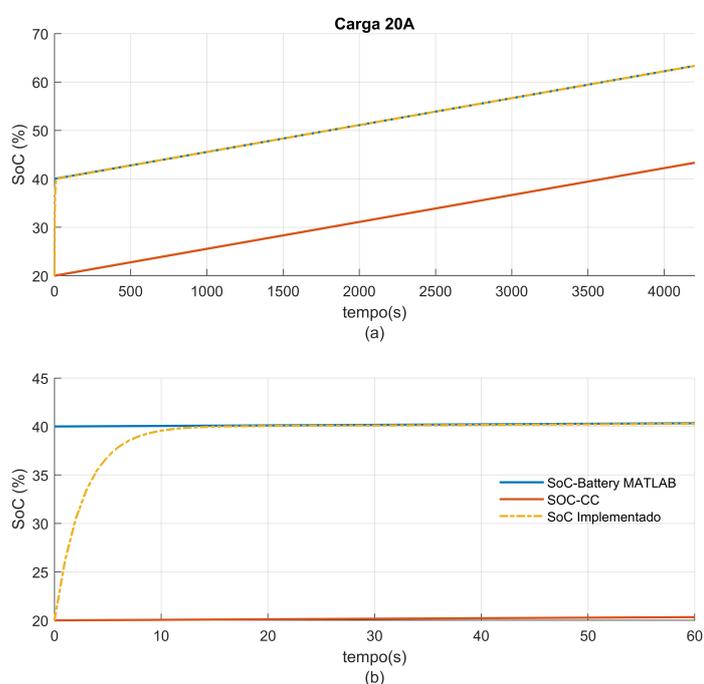
Legenda: (a) estado de carga a 50A e (b) ampliação no intervalo de 0 a 600s.

Fonte: Autor.

Observa-se que o tempo gasto para que o estado de carga real seja atingido pelo estado de carga implementado para carga e descarga foram diferentes. Isto se deve ao fato da aquisição de dados no momento de criação da *Lookup Table*, em resumo, se os dados coletados forem muito distantes do  $SoC_{real}$  inicial da bateria, levará um tempo maior para que o sistema atinja o estado de carga real.

Para as Figuras 35 e 36, nota-se que em ambos os casos o tempo para o SoC implementado atingir o  $SoC_{real}$  foi reduzido se comparado com os testes com os mesmos valores de correntes apresentados pelas Figuras 33 e 34. Isso ocorre quando o  $SoC_{real}$  se coincide com o estado de carga no momento da aquisição de dados.

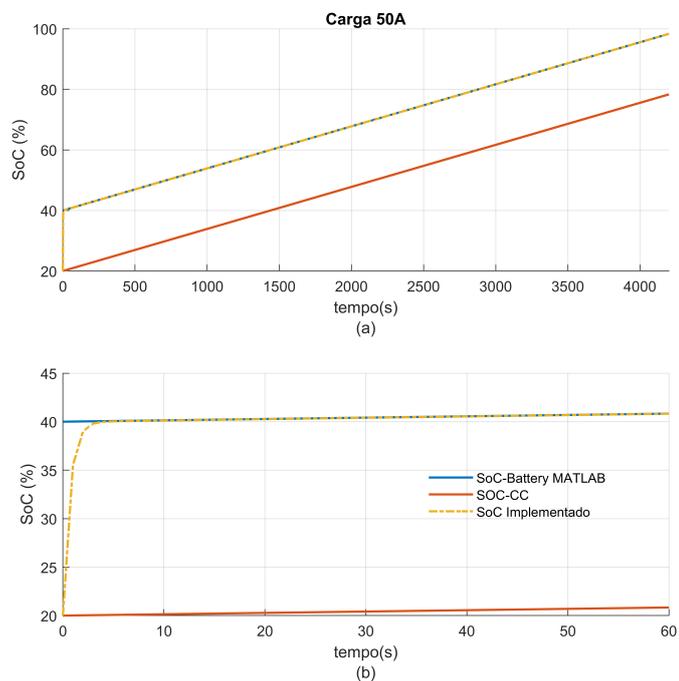
Figura 35 – Simulação para carga de 20A da bateria.



Legenda: (a) estado de carga a 20A e (b) ampliação no intervalo de 0 a 60s.

Fonte: Autor

Figura 36 – Simulação para carga de 50A da bateria.



Legenda: (a) estado de carga a 50A e (b) ampliação no intervalo de 0 a 60s.

Fonte: Autor.

## 5 Conclusão

O presente trabalho buscou abordar as características dos veículos elétricos em geral, buscando enfatizar o dispositivo fundamental para o seu funcionamento, a bateria. Os veículos elétricos vem ganhando espaço no cenário nacional e necessitam entregar uma maior eficiência, foram então retratados seus atributos como base para o conhecimento das baterias empregadas em sua fabricação.

A partir da revisão, na qual foram apresentadas algumas baterias existentes, é possível afirmar que as baterias de íons de lítio têm enorme potencial nas aplicações em veículos elétricos. Pôde-se observar os aspectos destas baterias e entender o motivo da necessidade do uso de um sistema de gerenciamento e monitoramento. Sistema este que é capaz de fazer com que as baterias se tornem mais confiáveis.

O estado de carga de uma bateria íons de lítio depende de fatores como temperatura, saúde da bateria, características internas, dentre outros. Foram apresentados alguns métodos existentes capazes de realizar o cálculo do estado de carga.

Foi então proposto a implementação de um sistema de monitoramento de baterias de íons de lítio, que fosse capaz de responder a condições anormais da bateria, neste caso através da análise de tensão e temperatura das células, como também cálculo do estado de carga da bateria. Foram realizados testes preliminares e foi possível evidenciar a efetividade dos circuitos propostos, tanto no monitoramento de temperatura quanto no de tensão.

Em seguida foi elaborada uma simulação que fosse capaz de realizar o cálculo de estado de carga da bateria de íon de lítio, parâmetro este que como enfatizado neste trabalho, é de extrema importância para passar confiabilidade ao usuário de um veículo elétrico. Foi proposto um sistema para cálculo, utilizando dois métodos apresentados no trabalho, método de Contagem Coulomb e Modelo Base. Adotou-se que seriam utilizados os dados da bateria coletados via *Simulink*, devido a impossibilidade de realizar os testes em laboratório com a bateria proposta.

Ao se analisar os resultados obtidos, o cálculo do estado de carga implementado se mostrou eficiente ao se comparados com os resultados esperados para cargas e descargas da bateria. Embora os resultados preliminares sejam satisfatórios, se faz necessário a integração dos circuitos propostos para constatar a eficácia de todo o sistema proposto.

### 5.1 Trabalhos futuros

Pelos conhecimentos adquiridos na realização deste trabalho, é possível implementar um sistema de monitoramento de baterias de íons de lítio para reais aplicações. Como funções de monitoramento de corrente, tensão e temperatura e estimação do estado de

carga (SoC) se vê necessário o acréscimo de um sistema que possibilita uma interação mais simples com o protótipo, incluindo display e um sistema de comunicação.

Com a intenção de dar continuidade neste trabalho, se faz necessário a inclusão de melhorias e correções, algumas delas são:

- Inserção de um *display* para que seja possível o acompanhamento em tempo real das variáveis levantadas pelo protótipo;
- Implementação de comunicação com o protótipo, comunicação que servirá para dar praticidade na leitura de dados do equipamento;
- Substituição do microcontrolador Arduíno MEGA 2560 por um outro microcontrolador;
- Finalização do protótipo de monitoramento de baterias de íons de lítio.

# Referências

- ANDREA, D. *Battery management systems for large lithium ion battery packs*. [S.l.]: Artech house, 2010. 17, 18
- ANEEL. *RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS, Levantamento de informações do Corredor Elétrico Sul do Brasil*. [S.l.]: ANEEL, 2018. 7
- CHENG, K. W. E. et al. Battery-management system (bms) and soc development for electrical vehicles. *IEEE transactions on vehicular technology*, IEEE, v. 60, n. 1, p. 76–88, 2011. 18, 30, 32
- CIRCUITAR. *Conversor analógico-digital de 4 canais*. 2018. Disponível em: <<https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/adc/index.html>>. 28
- CODECÀ, F.; SAVARESI, S. M.; MANZONI, V. The mix estimation algorithm for battery state-of-charge estimator-analysis of the sensitivity to measurement errors. In: IEEE. *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*. [S.l.], 2009. p. 8083–8088. 32
- CODECA, F.; SAVARESI, S. M.; RIZZONI, G. On battery state of charge estimation: A new mixed algorithm. In: IEEE. *2008 IEEE International Conference on Control Applications*. [S.l.], 2008. p. 102–107. 31
- EHSANI, M. et al. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. [S.l.]: CRC press, 2010. 1, 4, 5, 12
- FISK, H.; LEIJGÅRD, J. A battery management unit. Chalmers University of Technology, 2010. 10, 14
- FRIVALDSKY, M. et al. Design of measuring and evaluation unit for multi-cell traction battery system of industrial agv. *Electrical Engineering*, v. 102, n. 3, 2020. 29
- HANNAN, M. A. et al. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 78, p. 834–854, 2017. 17, 30, 31, 32, 33
- HART, D. W. *Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. 26
- HOROWITZ, P.; HILL, W. *A arte da eletrônica: circuitos eletrônicos e microeletrônica*. [S.l.]: Bookman, 2017. 26
- ILLERA, G. H. *Gestor de carga de baterias (BMS)*. Dissertação (Mestrado), 2014. 13, 30
- LARMINIE, J.; LOWRY, J. *Electric vehicle technology explained*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. 4, 5, 10, 12
- LEITMAN, S.; BRANT, B. *Build your own electric vehicle*. [S.l.]: McGraw Hill, 2009. 4

- LIPU, M. H. et al. A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 205, p. 115–133, 2018. 13
- LOWE, M. et al. Lithium-ion batteries for electric vehicles. *The US Value Chain, Contributing CGGC researcher: Ansam Abayechi*, 2010. 9, 14
- LU, L. et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of power sources*, Elsevier, v. 226, p. 272–288, 2013. 12, 13, 32
- MARQUES, J. M. B. *Battery Management Systems (BMS) for Li-Ion Batteries*. Dissertação (Mestrado), 2014. 1, 12, 13
- MICHELINI, A. *Baterias Recarregáveis para equipamentos portáteis*. [S.l.]: S.T.A. – Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA., 2017. 1, 8, 9, 10, 11, 12
- RIVERA-BARRERA, J.; MUNOZ-GALEANO, N.; SARMIENTO-MALDONADO, H. Soc estimation for lithium-ion batteries: review and future challenges. *Electronics*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 4, p. 102, 2017. 31, 32
- RODRIGUES, M. do C. B. P. *Integração de Filtro Ativo de Potência Monofásico e Bifásico ao Sistema de Propulsão de um Veículo Elétrico Tese*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2014. 1, 5, 6, 7, 15
- WANG, X.; STUART, T. An op amp transfer circuit to measure voltages in battery strings. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 109, n. 2, p. 253–261, 2002. 29
- XING, Y. et al. Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, Molecular Diversity Preservation International, v. 4, n. 11, p. 1840–1857, 2011. 1, 30
- YHDC. *Hall Open Loop Current Sensor*. 2019. Disponível em: <[http://en.yhdc.com/product/HK\(S\)2032-77.html](http://en.yhdc.com/product/HK(S)2032-77.html)>. 35

# Anexos

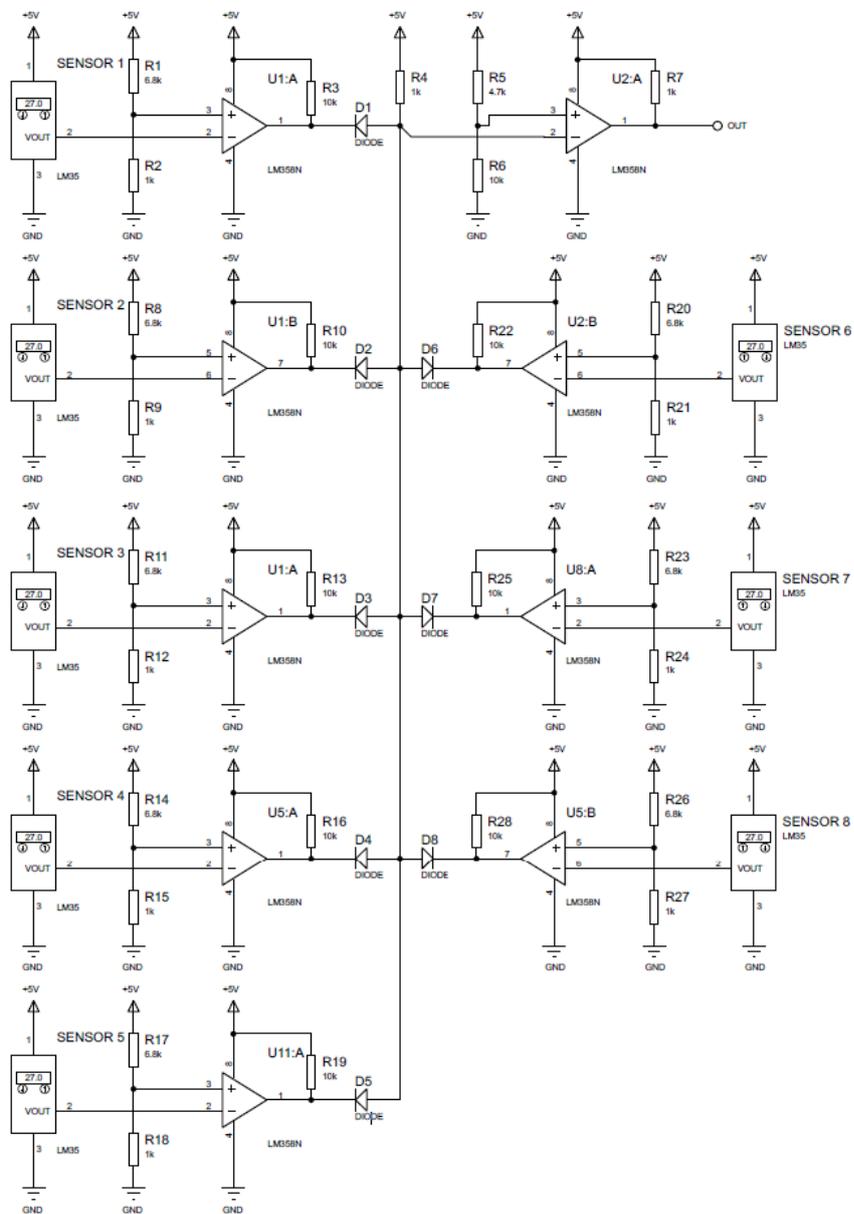
## A Especificações da bateria LFP-G100

### SPECIFICATION OF LFP-G100 / LFP-G4S100AH

Cell Voltage	Nominal Voltage: 3.2V
	Max cell voltage: 4.00V (Recommend not to exceed 3.80V)
	Min cell voltage: 2.50V (Recommend not to drop below 2.80V)
Capacity	100Ah
Operating temperature	Charge: 0°C to 65 °C (32F to 149F)
	Discharge: -20°C to 65 °C (-4F to 149F)
	Temperature Durability of Case: ≤135 °C (275F)
Current range	Up to 3C (300A) continuous current for charging and discharging
	Up to 10C (1000A) impulse (≤10 seconds) discharge current
	Recommended charging and discharging current: 0.5C (50A)
Internal Resistance	≤1.8mΩ
Energy Density	90-110 Wh/kg
Cycle life	Cell: 2000 cycles at 80% DOD at room temperature
	Pack: 1500 cycles at 80% DOD at room temperature
Self discharge	Max 3% per month
Cell Dimension & Weight	Without cover: 140x62x236mm (5.5x2.5x9.3 inches)
	With cover: 140x62x243mm (5.5x2.5x9.6 inches)
4-Cell Pack Dimension & Weight	Without Aluminum case: 248x140x243 mm (10x5.5x9.6 inches)
	With Aluminum case: 262x140x243mm (10.32x5.5x9.6 inches)
Weight	Cell: 3.2Kg±100g (7LB)
	4-cell pack: 12.9Kg (28.5LB)
Picture	 <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 100px;"><b>3.2V cell</b></span> <b>12.8V pack</b> </p>

## B Circuito para comparar temperatura das células

Figura 37 – Circuito para comparar a temperatura das células.



Fonte: Autor.

## C Folha de dados sensor de corrente HKS2032

### Hall open loop current sensor



Model: HKS2032

Open loop hall circuit, Sub-plate installation.  
Detect DC, AC and pulse current

Technical indicators:

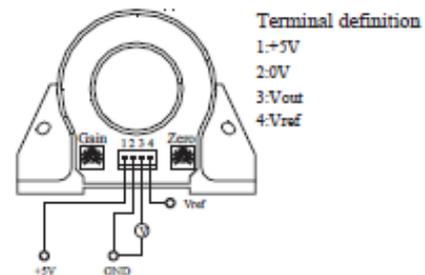
- Flame resistance: UL94-V0
- Working temperature: -10~+70°C
- Storage temperature: -40~+85°C
- Bandwidth: DC~50kHz
- Dielectric strength: 6KV 50Hz 1min



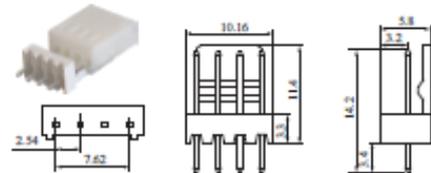
Electrical parameters:

$I_T$	Rated input	$\pm 100$	A
$I_{TM}$	Input measured range	$\pm 300$	A
$V_{OUT}$	Rated output	$2.5 \pm 0.625$	V
X	Accuracy	1	%
$\epsilon_L$	Linearity	$< 0.1$	%
$V_C$	Supply voltage( $\pm 5\%$ )	+5	V
$I_C$	Current consumption	$\pm 10$	mA
$R_L$	Load impedance	$> 2K$	$\Omega$
$I_{OFF}$	Zero offset, TA=25°C	$\leq \pm 0.3$	mA
$T_R$	Response time	$< 1$	$\mu s$
N.W	Weight	215	g

Connection Diagram:

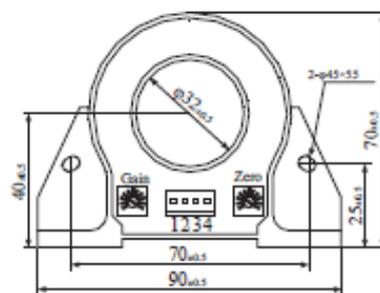


connector schematic diagram:



Cold-press terminal plug /socket, Distance 2.54, Stitch size 0.5-0.5

Dimensions ( in mm ) :



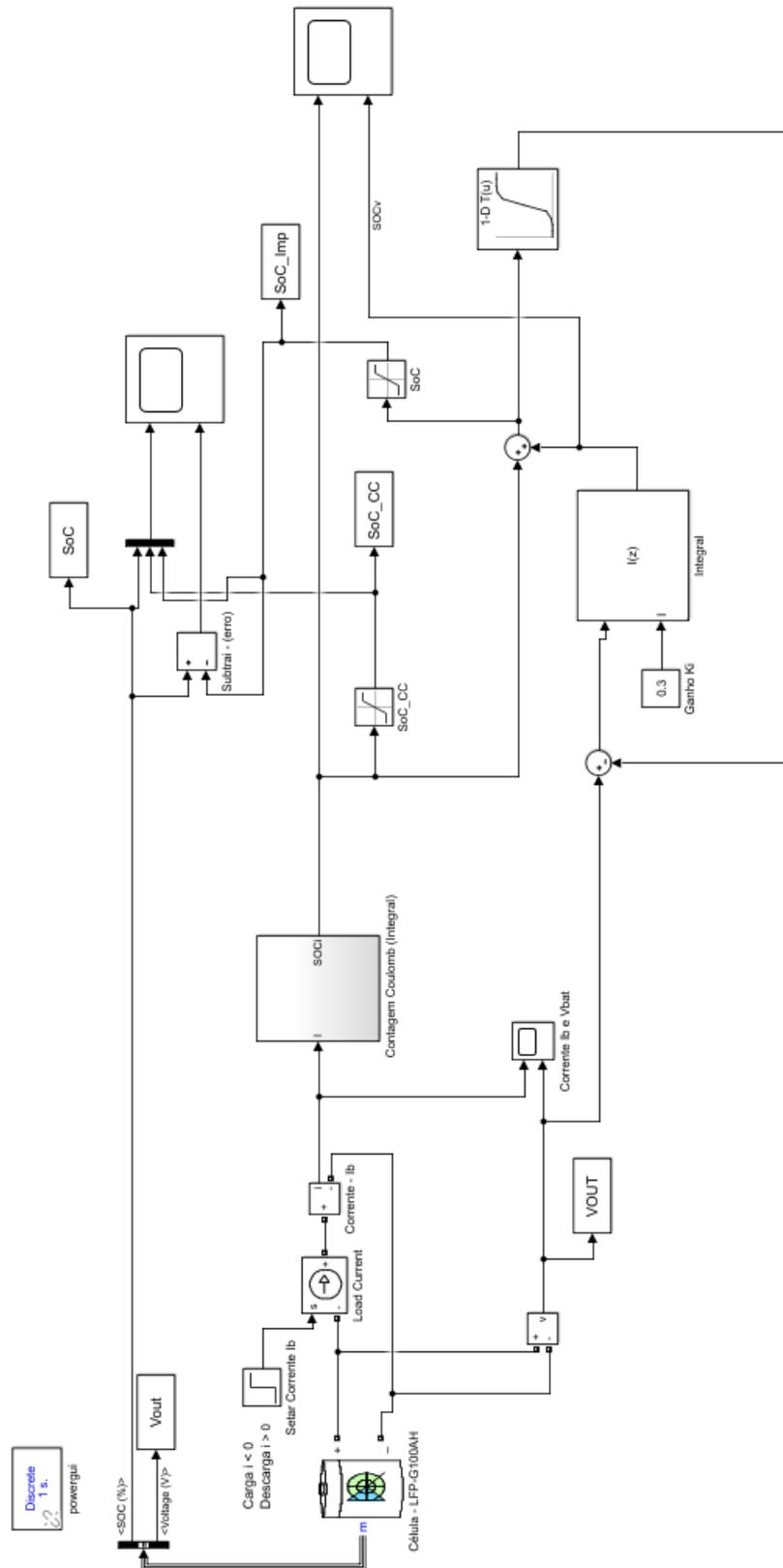
Front view



Bottom view

## D Estado de carga implementado *Simulink*

Figura 38 – Circuito implementado via *Simulink*



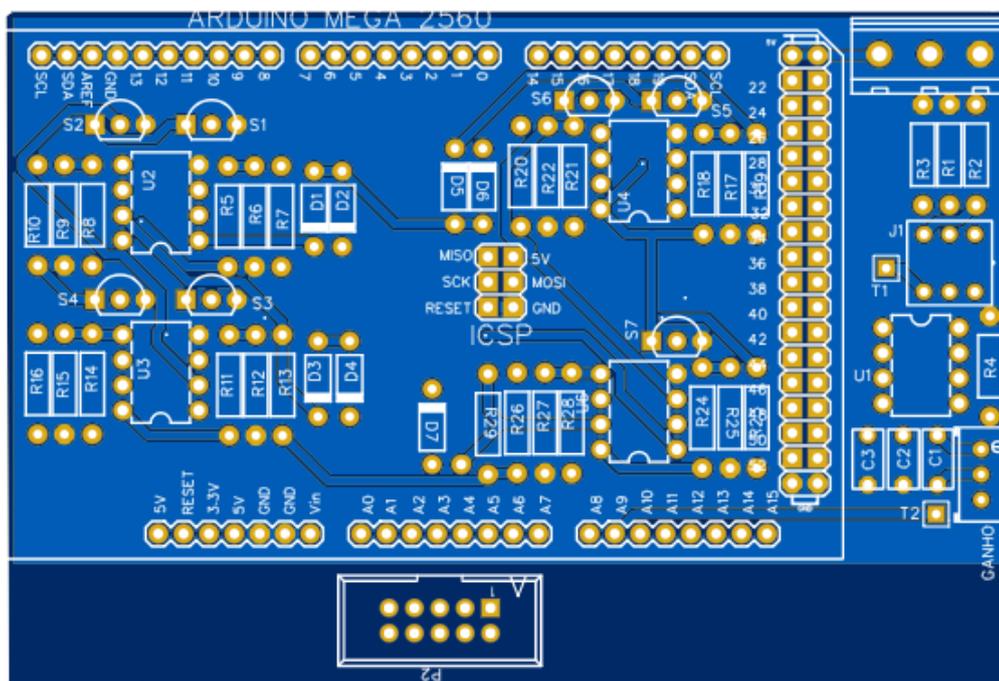
Fonte: Autor



## E.2 Placa de Circuito Impresso

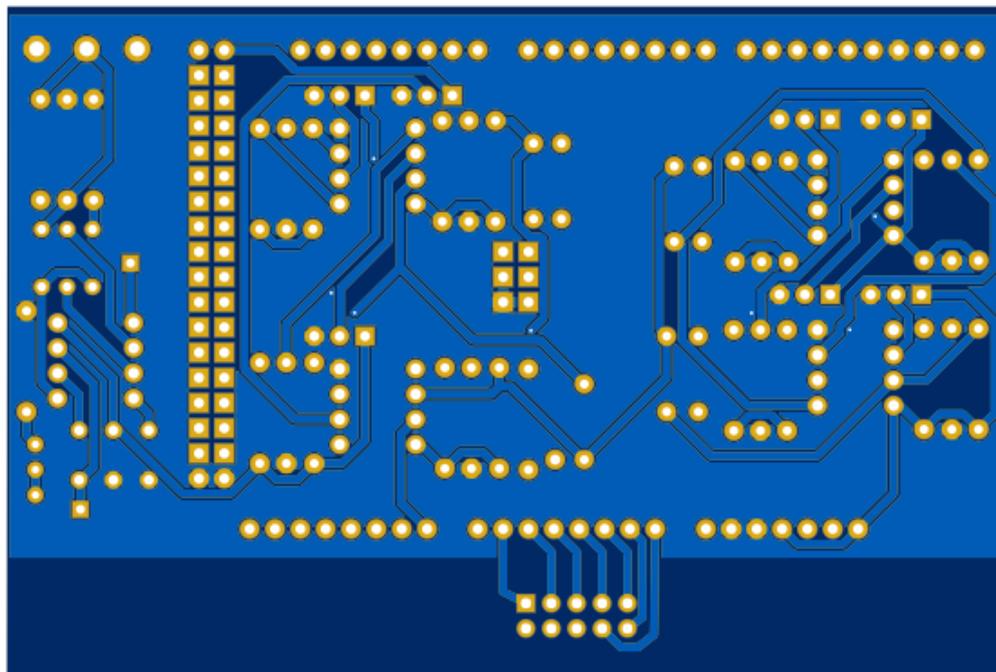
A PCB do protótipo é apresentada pelas Figuras 40 e 41, esta que recebe as informações providas da PCB de monitoramento de tensão através do borne P2. Com intuito de otimização de espaço/tamanho o Arduino 2560 é acoplado na parte superior da placa de circuito impresso. Dimensões da placa: 10,4cm x 7,7cm.

Figura 40 – PCB - Circuito de monitoramento de baterias - Vista Superior.



Fonte: Autor.

Figura 41 – PCB - Circuito de monitoramento de baterias - Vista Inferior.



Fonte: Autor.