



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

Thiago Teixeira da Motta

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO:
BMS com aplicação em veículo elétrico

Florianópolis, Santa Catarina – Brasil
2022

Thiago Teixeira da Motta

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO :
BMS com aplicação em veículo elétrico

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr. sc. ETH Zürich

Florianópolis, Santa Catarina – Brasil

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Motta, Thiago Teixeira da
Sistema de gerenciamento de baterias de íons de lítio :
BMS com aplicação em veículo elétrico / Thiago Teixeira da
Motta ; orientador, Marcelo Lobo Heldwein, 2022.
92 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, , Graduação em ,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. . 2. BMS. 3. Baterias. 4. Íon de lítio. 5. Veículo
elétrico. I. Heldwein, Marcelo Lobo. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em . III. Título.

Thiago Teixeira da Motta

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO: BMS com aplicação em veículo elétrico

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado(a) para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, e foi aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do EEL – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, CTC – Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, Santa Catarina – Brasil, 16 de setembro de 2022.

Prof. Fernando Rangel de Sousa, Dr. sc.
Coordenador(a) do Curso de Graduação
em Engenharia Eletrônica

Banca Examinadora:

Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr. sc.
ETH Zürich
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa
Catarina – UFSC

Prof. Gierri Waltrich, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina –
UFSC

Marcos Aurelio Izumida Martins, Dr.
Fundação CERTI

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a toda minha família, que sempre me apoio nas escolhas da vida, sempre estiveram junto comigo e por isso sou eternamente grato.

Agradeço aos meus amigos, e sócios, André Venzon e Gustavo Pereira por acreditarem no meu trabalho e me ajudarem em diversos momentos da carreira, desde 2015 quando trabalhamos juntos na Ampera até hoje onde fundamos junto a MVP e-solutions e atuamos com desenvolvimento de tecnologia nacional para mobilidade elétrica.

Gostaria de deixar registrado um agradecimento especial ao prof. Dr. Marcelo Lobo Heldwine, por todo o apoio prestado, não só durante o TCC, mas também ao apoio prestado á equipe Ampera Racing, o qual participei por três anos.

Agradeço a equipe Ampera Racing, por propiciar um ambiente rico de oportunidades para estudantes da graduação, foi lá onde tive o meu maior desenvolvimento profissional.

Agradeço a todo o corpo docente, funcionários técnicos administrativos e terceirizados da Universidade Federal de Santa Catarina, por fazerem dela uma dentre as melhores do Brasil.

Aos meus colegas de curso.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste projeto e conclusão da minha graduação.

*"Não creio que haja uma emoção, mais intensa para um inventor do que ver suas criações funcionando.
Essa emoção faz você esquecer de comer, de dormir, de tudo."
Nikola Tesla*

RESUMO

MOTTA, Thiago Teixeira. **SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO: BMS com aplicação em veículo elétrico**. 90 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2022.

O BMS (*Battery Management System*) é um dispositivo eletrônico responsável por fazer o gerenciamento de células de uma bateria recarregável, monitorando tensão, corrente, temperatura e garantindo que o sistema opere somente dentro de condições seguras. Com a crescente escalada dos veículos elétricos, muito começou a se falar sobre os cuidados necessários com as baterias de íons de lítio. Devido à sua alta densidade energética, o colapso de uma dessas baterias pode gerar danos graves às pessoas ou bens no entorno dela. Para evitar tais colapsos, utiliza-se um sistema de gerenciamento de baterias (BMS). Este trabalho propõe o projeto de um sistema capaz de garantir o funcionamento seguro de um banco de baterias de íons de lítio, constituindo um sistema (*hardware e software*) para realizar o gerenciamento da bateria de um veículo elétrico. Esse sistema irá monitorar os parâmetros da baterias como temperatura, tensão e corrente. Com os dados adquiridos e através de um modelo matemático, o sistema é capaz de estimar o estado de carga da bateria. Todas essas informações também estarão disponibilizadas através de comunicação CAN no padrão SAE J1939.

Palavras-chaves: BMS. Veículo elétrico. Bateria. íon de lítio. Balanceamento.

ABSTRACT

MOTTA, Thiago Teixeira. **LITHIUM ION BATTERY MANAGEMENT SYSTEM: BMS with application in electric vehicle**. 90 pages. Final Course Assignment (Graduation in Electronic Engineering) - Federal University of Santa Catarina. Florianópolis, 2022.

The BMS (Battery Management System) is an electronic device responsible for managing the cells of a rechargeable battery, monitoring voltage, current, temperature and ensuring that the system only operates under safe conditions. With the increasing rise of electric vehicles, much was said about the necessary care with lithium ion batteries. Due to its high energy density, the collapse of one of these batteries can cause serious damage to people or property around it. To avoid such breakdowns, a BMS is used. This work proposes the design of a system capable of guaranteeing the safe operation of a lithium ion battery bank, constituting a system (hardware and software) to perform the battery management of an electric vehicle. This system will monitor battery parameters such as temperature, voltage and current. With the acquired data and through a mathematical model, the system is able to estimate the battery charge state. All this information will also be made available through CAN communication in the SAE J1939 standard.

Keywords: BMS. Electric Vehicle. Battery. Li-ion. Balancing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Comparação entre químicas de baterias. (ZHANG <i>et al.</i> , 2018)	23
Figura 2	– Modelo Rint. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)	23
Figura 3	– Modelo RC. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)	24
Figura 4	– Modelo Thévenin. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)	24
Figura 5	– Modelo PNGV. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)	25
Figura 6	– Modelo DP. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)	25
Figura 7	– Erro estimado dos modelos estudados. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)	26
Figura 8	– BMS com topologia tipo centralizado. Fonte: (HU, 2011)	27
Figura 9	– BMS com topologia tipo distribuído. Fonte: (HU, 2011)	27
Figura 10	– BMS com topologia tipo modular. Fonte: (HU, 2011)	28
Figura 11	– Sensor <i>shunt</i>	28
Figura 12	– Medição por efeito Hall.	29
Figura 13	– Termistor PTC.	30
Figura 14	– Termopar.	30
Figura 15	– Infravermelho.	31
Figura 16	– Topologia de balanceamento dissipativo. Fonte: (DAOWD <i>et al.</i> , 2014)	32
Figura 17	– Topologia de balanceamento não dissipativo. Fonte: (DAOWD <i>et al.</i> , 2014)	32
Figura 18	– Bitmap CAN. Fonte: (SAE INTERNATIONAL, s.d.[b])	36
Figura 19	– Padrão SAE J1939/71 para o ID. Fonte: (KVASER, s.d.)	37
Figura 20	– Tabela SAE J1939/71.	38
Figura 21	– Curva experimental tensão da célula. Fonte: Autor (2021)	40
Figura 22	– Curva experimental de corrente de descarga. Fonte: Autor (2021)	41
Figura 23	– Curva experimental de temperatura da célula. Fonte: Autor (2021)	41
Figura 24	– Temperatura da célula durante ensaio de descarga. Fonte: Autor (2021)	42
Figura 25	– Curva experimental de OCV x SoC da célula 1. Fonte: Autor (2021)	42
Figura 26	– Curva experimental de OCV x SoC da célula 2. Fonte: Autor (2021)	42
Figura 27	– Curva experimental de OCV x SoC da célula 3. Fonte: Autor (2021)	43
Figura 28	– Variação da curva de OCV em função da temperatura. Fonte: Autor (2021)	43
Figura 29	– Formulas para cálculo dos parâmetros (PLETT, 2018)	44
Figura 30	– Tensão em ensaio de descarga pulsada de 45 A. Fonte: Autor (2021)	45
Figura 31	– Temperatura em ensaio de descarga pulsada de 45 A. Fonte: Autor (2021)	45

Figura 32	– Pulso de corrente de 45 A aplicados ao ensaio de descarga. Fonte: Autor (2021)	45
Figura 33	– Pontos experimentais de resistência interna em função do SoC. Fonte: Autor (2021)	46
Figura 34	– Curvas de resistência interna em função do SoC. Fonte: Autor (2021)	46
Figura 35	– Curvas de resistência interna por temperatura e SoC. Fonte: Autor (2021)	47
Figura 36	– Curva da resistência interna modelada. Fonte: Autor (2021)	48
Figura 37	– Circuito equivalente. Fonte: Autor (2021)	49
Figura 38	– Comparativo entre curva experimental e modelada. Fonte: Autor (2021)	50
Figura 39	– Erro relativo do modelo encontrado. Fonte: Autor (2021)	50
Figura 40	– Comparativo do SoC real e o estimado pelo modelo. Fonte: Autor (2021)	51
Figura 41	– Comparativo de tensão no terminal da célula e em circuito aberto. Fonte: Autor (2021)	51
Figura 42	– Erro relativo para estimativa do SoC. Fonte: Autor (2021)	51
Figura 43	– Fluxograma do algoritmo de controle. Fonte: Autor (2021)	52
Figura 44	– Fluxograma do <i>watchdog</i> . Fonte: Autor (2021)	53
Figura 45	– Acionamento do contator. Fonte: Autor (2021)	54
Figura 46	– Acionamento do sistema de arrefecimento. Fonte: Autor (2021)	54
Figura 47	– Fluxograma da máquina de estados. Fonte: Autor (2021)	55
Figura 48	– Fluxograma da operação do BMS. Fonte: Autor (2021)	56
Figura 49	– Topologia modular escolhida para o projeto. Fonte: Autor (2021)	57
Figura 50	– LTC6804 Analog Devices. (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, s.d.[a])	58
Figura 51	– ISO1042 Texas Instruments. Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, s.d.)	58
Figura 52	– Sensor de corrente por efeito Hall. Fonte: (LEM INTERNATIONAL SA, s.d.)	59
Figura 53	– Kit de desenvolvimento MPC5748G. (NXP SEMICONDUCTOR, s.d.)	59
Figura 54	– Esquemático do filtro EMC. Fonte: (GENERAL ELECTRIC COMPANY, s.d.)	60
Figura 55	– Esquemático do circuito da fonte de alimentação. Fonte: Autor (2021)	61
Figura 56	– Esquemático do circuito CAN. Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, s.d.)	61
Figura 57	– Esquemático do circuito SPI. Fonte: (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, s.d.[b])	62
Figura 58	– Esquemático do circuito do sensor de corrente. Fonte: Autor (2021)	62
Figura 59	– Esquemático do circuito do sensor de tensão. Fonte: Autor (2021)	63
Figura 60	– Esquemático do circuito de saída a rele. Fonte: Autor (2021)	64

Figura 61	–	Esquemático da unidade de aquisição. Fonte: (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, s.d.[a])	64
Figura 62	–	Diagrama de Bode filtro passa-baixas. Fonte: Autor (2021)	65
Figura 63	–	Esquemático do circuito de aquisição de tensão. Fonte: (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, s.d.[a])	65
Figura 64	–	Projeto final unidade de controle face superior. Fonte: Autor (2021)	70
Figura 65	–	Projeto final unidade de controle face inferior. Fonte: Autor (2021)	71
Figura 66	–	Projeto final unidade de aquisição face superior. Fonte: Autor (2021)	71
Figura 67	–	Projeto final unidade de aquisição face inferior. Fonte: Autor (2021)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Resultado estatístico do erro de cada modelo. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)	26
Tabela 2	–	Equações do algoritmo de Kalman.	35

LISTA DE CÓDIGOS

Código 1	–	Filtro de Kalman implementado em Python	73
Código 2	–	Codigo para a regressão de parâmetros da bateria	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMS	Battery Management System
CAN	Controller Area Network
SAE	Society of Automobile Engineers
LiPO	Polímero de Lítio
NiCd	Níquel Cádmio
VCU	Vehicle Control Unit
ISO	International Organization for Standardization
PCI	Placa de Circuito Impresso
SOA	Safety Operation Area
SoC	State of Charge
SoH	Society of Automobile Engineers
DoD	Depth of Discharge
LiFePO4	Lítio Ferro Fosfato
LCO	Lítio Cobalto
NMC	Níquel Manganês Cobalto
NTC	Negative Temperature Coefficient)
PTC	Positive Temperature Coefficient)
DLC	Data Length Code
RTR	Remote Transmission Request
IDE	ID Extended
PGN	Parameter Group Number
OCV	Open Cell Voltage
SPI	Peripheral Interface
CC	Corrente Contínua
AEC	Automotive Electronics Council

CCL	Charge Current Limit
DCL	Discharge Current Limit
IMD	Isulation Monitoring Device

LISTA DE SÍMBOLOS

VDC	Tensão em corrente contínua
$bits/s$	Bits por segundo
$^{\circ}C$	Grau Celsius
V	Volt
A	Ampere
Ah	Amper-hora
$\%$	porcento
Ω	Ohm
Hz	Hertz
dB	Decibel
R_0	Resistência interna da célula
R_1	Resistor de polarização
C_1	Capacitor de polarização
OCV	Tensão em circuito aberto da célula
V_{bat}	Tensão no terminal da célula
I	Corrente na célula
t	Instante de tempo
T	Temperatura da célula
I_{R_1}	Corrente no resistor de polarização
Δt	Passo de tempo
V_{C_1}	Tensão de polarização da célula

SUMÁRIO

I	CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTADO DA ARTE	18
1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivos Especificos	20
1.2	METODOLOGIA	20
2	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	22
2.1	BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO	22
2.1.1	Modelo Rint	23
2.1.2	Modelo RC	24
2.1.3	Modelo Thévenin	24
2.1.4	Modelo PNGV	25
2.1.5	Modelo DP	25
2.2	TOPOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO	26
2.2.1	Centralizado	26
2.2.2	Distribuído	27
2.2.3	Modular	27
2.3	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE	28
2.4	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	29
2.4.1	Termistor	29
2.4.2	Termopar	30
2.4.3	Infravermelho	30
2.5	MÉTODOS DE EQUALIZAÇÃO DE ENERGIA	31
2.5.1	Princípio do balanceamento dissipativo	31
2.5.2	Princípio do balanceamento não dissipativo	32
2.6	FILTRO DE KALMAN	32
2.7	PROTOCOLO DA COMUNICAÇÃO CAN	35
II	IMPLEMENTAÇÃO	39
3	MODELAGEM DAS CÉLULAS	40
3.1	MODELO ELÉTRICO DA BATERIA	40
4	PROJETO DO ALGORITMO DE CONTROLE	52
4.1	AQUISIÇÃO DOS DADOS	53
4.2	LÓGICA DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DO BMS	53
4.3	MÁQUINA DE ESTADOS	55

5	PROJETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO	57
5.1	TOPOLOGIA DO BMS	57
5.2	COMPONENTES E PARÂMETROS DE PROJETO	57
5.3	PROJETO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS	59
5.3.1	Projeto unidade de controle	60
5.3.1.1	Alimentação	60
5.3.1.2	Comunicação	61
5.3.1.3	Medição da corrente	62
5.3.1.4	Medição da tensão	63
5.3.1.5	Saídas digitais	63
5.3.2	Projeto da unidade de aquisição	64
5.3.3	Medição das tensões e balanceamento	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6.1	RECOMENDAÇÕES FUTURAS	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE A – ANEXO PROJETO CIRCUITOS ELETRONICOS	70
	APÊNDICE B – ANEXO CODIGO PARA A REGRESSÃO DE PARÂMETROS DA BATERIA	73
	APÊNDICE C – ANEXO CODIGO PARA A REGRESSÃO DE PARÂMETROS DA BATERIA	74
	ANEXO A – FOLHA DE DADOS DA CÉLULA DE BATERIA UTILIZADA	76

Parte I

Contextualização e estado da arte

1 INTRODUÇÃO

Apesar da tecnologia parecer novidade para muitos, o carro movido a propulsão elétrica teve seu início em 1827, pelo húngaro Ányos Jedlik. Após isso alguns pesquisadores começaram a desenvolver esse conceito, porém apenas nos anos 1900 que se iniciou a fabricação em massa de veículos elétricos. Devido ao baixo desempenho dos sistemas de armazenamento de energia da época, o veículo elétrico foi rapidamente vencido por veículos movidos a combustão interna, que conseguiam uma autonomia muito superior. A propulsão elétrica, nessa época, acabou então sendo utilizada em linhas ferroviárias, onde se tem a possibilidade de manter o sistema acoplado à rede elétrica, sem a necessidade de um sistema de armazenamento de energia.

Com a crescente escalada dos veículos elétricos, muitas montadoras começaram a voltar suas pesquisas para essa área promissora. Foi o avanço da tecnologia das baterias, mais precisamente das baterias de Íons de Lítio (Li-ion), que propiciou esse crescimento repentino dos veículos elétricos. As baterias de Li-ion são baterias recarregáveis de alta densidade energética, assim, possibilitando uma maior autonomia aos veículos elétrico e viabilizando comercialmente o seu uso.

Devido à alta densidade energética, o colapso de uma dessas baterias pode gerar danos graves à pessoas ou bens ao redor. Para evitar com que isso ocorra, utiliza-se um sistema de gerenciamento de baterias (BMS - *Battery Management System*). O BMS é o sistema responsável por monitorar, controlar e proteger uma célula ou banco de baterias recarregáveis. É um sistema fundamental e indispensável para a segurança e otimização de vida útil das baterias.

Baterias de íon de lítio não necessitam nenhum tipo de manutenção no decorrer da sua vida, também não apresentam o chamado "efeito memória", que ocorre com outras químicas como níquel Cádmio (NiCd). Devido a essas características citadas, hoje em dia as baterias de íons de lítio são amplamente usadas em todos os dispositivos eletrônicos móveis como smartphones, notebooks, tablets, smartwatch, etc. O tipo mais usado nesses casos é a bateria de Lítio Polímero (LiPO), por ter um bom custo benefício quando comparado a densidade energética dessa química.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de bateria capaz de garantir o funcionamento seguro de um banco de baterias de íons de lítio, seguindo as normas de segurança necessárias. O sistema também deve ser capaz de se comunicar com a VCU (*Vehicle Control Unit*) do veículo, via protocolo CAN. Por se tratar de baterias de alta tensão (por norma veicular da SAE qualquer tensão superior a 60 VDC é considerada alta tensão) o sistema deve contribuir para manter o isolamento entre a parte de alta tensão e o sistema de baixa tensão, que alimenta toda a eletrônica do veículo.

1.1.1 Objetivos Específicos

O projeto será constituído de um sistema (*hardware* e *software*) para realizar o gerenciamento do banco de baterias de íons de lítio de um veículo elétrico. Esse sistema irá monitorar os parâmetros das baterias como temperatura, tensão e corrente. Com os dados adquiridos e por meio de um modelo matemático, o sistema será capaz de estimar o estado de carga da bateria, também contando com a implementação de algoritmos de filtragem, como o filtro de Kalman.

Todas essas informações serão disponibilizadas através de comunicação CAN padrão SAE J1939 para que a VCU do veículo consiga utilizar essas informações no seu controle.

Os objetivos do projeto são:

- Componentes compatíveis com ISO 26262;
- Isolado galvanicamente;
- Comunicação CAN padrão SAE J1939;
- Confiabilidade;

1.2 METODOLOGIA

Como o principal objetivo é garantir a segurança durante a utilização do sistema de armazenamento de energia, o projeto inicia com o estudo de algumas normas automotivas e resumo das exigências de segurança necessárias para o funcionamento do sistema. Em seguida, inicia-se o estudo das topologias de BMS já existentes, com a finalidade de relacionar os prós e contras de cada topologia existente.

Com a topologia escolhida, inicia-se a fase de projeto e simulação do circuito, com o objetivo de prever o funcionamento do circuito e a sua adequação às exigências de projeto. Com a definição do projeto, parte-se para o design da PCI (Placa de Circuito Impresso), a qual também aplicam-se algumas exigências.

Em paralelo ao projeto da placa de circuito impresso, serão feitos ensaios de carga e descarga com as células de bateria utilizadas no projeto. Os ensaios servirão para definir os parâmetros a serem utilizados no modelo matemático para a estimativa de estado de carga. Também será desenvolvido o algoritmo de controle embarcado no microcontrolador da unidade de controle do BMS.

Após o projeto montado, começam os testes e validações do sistema, impondo ao BMS diversas situações de funcionamento com a finalidade de avaliar o seu desempenho e se está operando conforme o esperado.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

O BMS é o dispositivo eletrônico responsável por fazer o gerenciamento de células de bateria recarregável, monitorando a tensão, corrente e temperatura das células, e garantir que o sistema opere somente dentro das condições seguras de operação (SOA - *Safety Operation Area*). Com essas informações o BMS também consegue calcular o estado de carga (SoC - *State of Charge*), estado de saúde (SoH - *State of Health*), profundidade de descarga (DoD - *Depth of Discharge*) dentre outros parâmetros do sistema, para que se possa ter uma previsão do funcionamento (DAOWD *et al.*, 2014).

Devido a desvios de fabricação, as células de bateria podem apresentar resistência interna, fuga de corrente e capacidade energética diferentes umas das outras. As variações entre os parâmetros de cada célula fazem com que elas carreguem e descarreguem de forma desbalanceada, e assim, influenciem o desempenho da bateria como um todo. Para resolver este desbalanceamento de carga, uma outra função do BMS é fazer a equalização da energia entre as células que o constitui, e essa qualização pode ser feita através do balanceamento não dissipativo ou balanceamento dissipativo.

2.1 BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Uma bateria é uma, ou mais, células combinadas em série e ou paralelo para se obter um determinado valor de tensão e energia. Conectando as células em série, a tensão da bateria aumenta, e conectando as baterias em paralelo, a capacidade aumenta sem interferir na tensão. Comparada com células de outros materiais, as células de Li-ion tem as vantagens de alta densidade energética, alta densidade de potência, longo ciclo de vida entre outros (ZHANG *et al.*, 2018). Existem diversas químicas de baterias de Li-ion, sendo as mais conhecidas a Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄), Polímero de Lítio (LiPO), Lítio Cobalto (LCO) e Níquel Manganês Cobalto (NMC), sendo que cada tipo de bateria tem as suas características e parâmetros diferentes, algumas com maior densidade energética, outras com maior ciclo de vida. A Figura 1 mostra o comparativo dentre algumas químicas utilizadas.

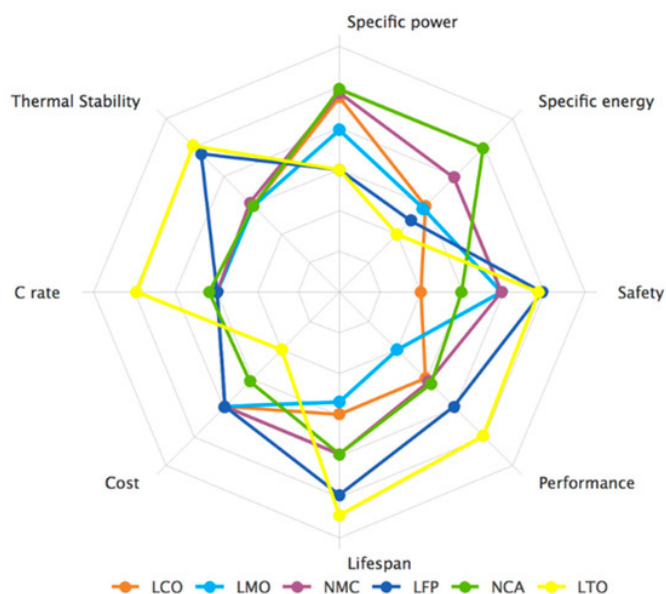


Figura 1 – Comparação entre químicas de baterias. (ZHANG *et al.*, 2018)

Para se ter o comportamento das baterias, pode-se modelá-la por meio de um circuito equivalente, o qual tem o comportamento equivalente ao da célula. Existem diversas formas de compor esse circuito, a escolha do modelo a ser utilizado foi baseada no estudo de [Hongwen He e Fan \(2011\)](#) do Beijing Institute of Technology, China, que fez a comparação dos seguintes modelos:

2.1.1 Modelo Rint

O modelo Rint é um dos modelos mais simples que se utiliza para a modelagem da bateria, U_{OC} é uma fonte de tensão ideal que representa a tensão em circuito aberto da bateria e R_0 representa a resistência interna da célula, ambos os valores estão em função do estado de carga, estado de saúde e temperatura da bateria.

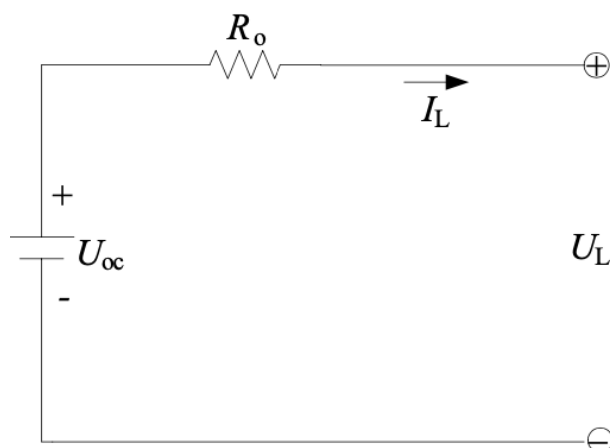


Figura 2 – Modelo Rint. Fonte: ([HONGWEN HE; FAN, 2011](#))

2.1.2 Modelo RC

O modelo RC é representado por três resistores (R_e , R_C , R_t) e dois capacitores (C_b , C_C) e foi desenvolvido pela SAFT Battery Company. O capacitor C_b representa a capacidade de armazenamento energético da bateria, e o capacitor C_C representa o comportamento dinâmico da célula.

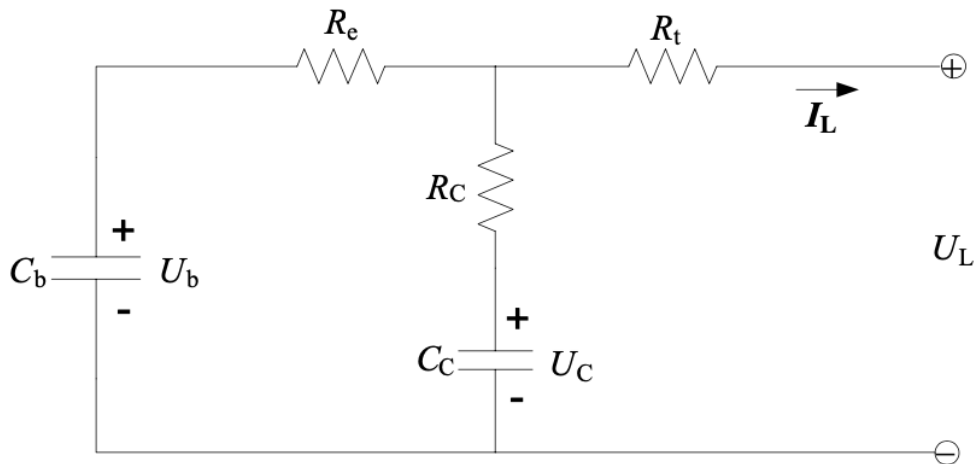


Figura 3 – Modelo RC. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)

2.1.3 Modelo Thévenin

O modelo de Thévenin segue o modelo Rint, com U_{OC} como fonte de tensão ideal e R_0 representando a resistência interna da célula, porém com a adição de uma rede RC para representar o comportamento dinâmico da bateria. O resistor R_{TH} é chamado de resistor de polarização e o capacitor C_{TH} descreve o comportamento transiente entre carga e descarga da bateria.

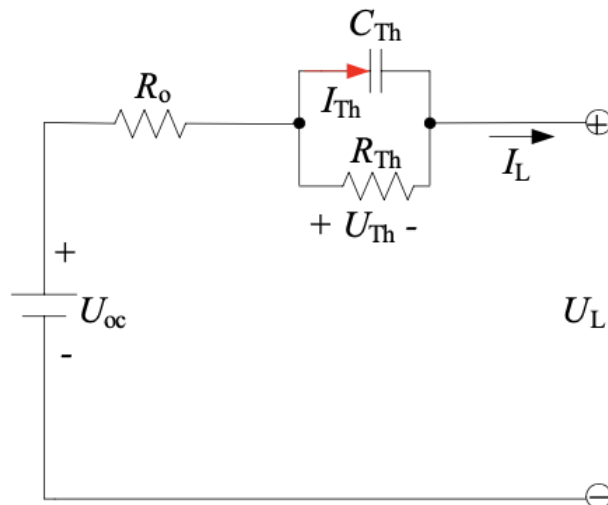


Figura 4 – Modelo Thévenin. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)

2.1.4 Modelo PNGV

Seguindo o modelo Thévenin, o modelo PNGV adiciona um capacitor em série com a fonte de tensão para descrever a variação da tensão em circuito aberto causada pela corrente que circula na bateria.

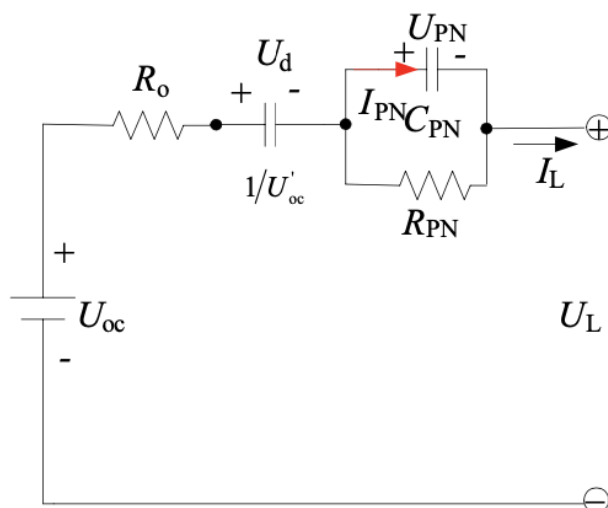


Figura 5 – Modelo PNGV. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)

2.1.5 Modelo DP

O modelo de polarização dupla, que vem do inglês *dual polarization* (DP), é o modelo Thévenin com o acréscimo de mais uma rede RC. Esse incremento vem para modelar separadamente a polarização de concentração e a polarização eletroquímica da bateria.

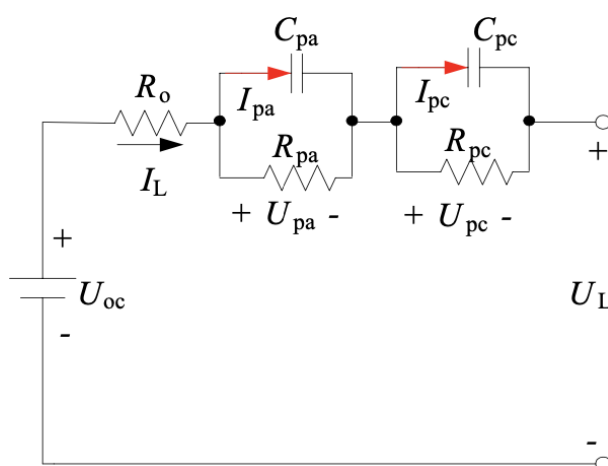


Figura 6 – Modelo DP. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)

Analisando os resultados do estudo referenciado acima, percebe-se rapidamente que, o modelo Rint, que leva em conta apenas a resistência interna da célula tem um erro crescente com o tempo, conforme demonstra a figura 7, o que inviabiliza a sua utilização. Os dados obtidos pelo estudo, exposto na tabela 1, demonstram que

os dois modelos com menor erro são o modelo Thévenin e o modelo DP. O modelo DP, dupla polarização, é uma variação do modelo Thévenin que utiliza duas redes RC para refinar as características de polarização e simular a polarização concentrada e polarização eletroquímica separadamente (HONGWEN HE; FAN, 2011).

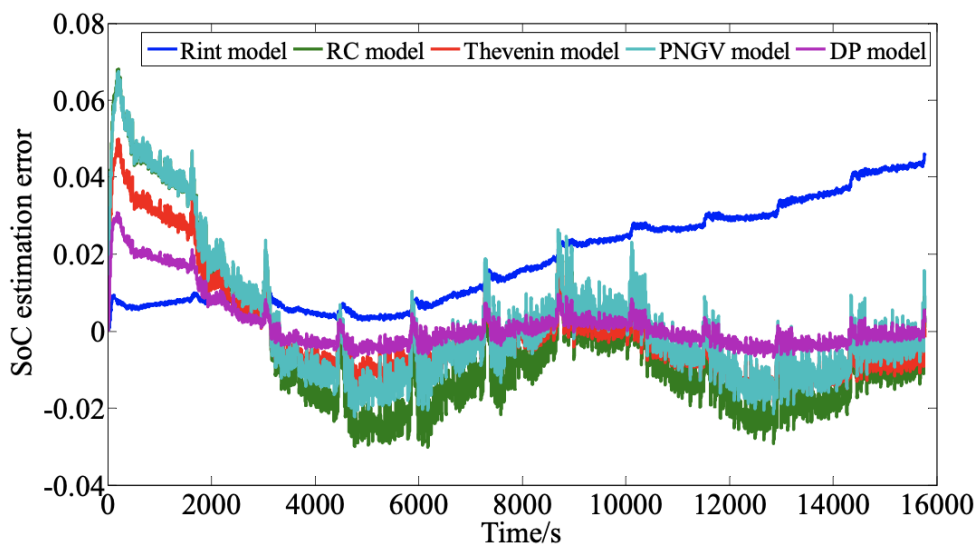


Figura 7 – Erro estimado dos modelos estudados. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)

Modelo	Máximo	Média	Variância	Final
Modelo Rint	0,0462	0,0186	0,0012	0,046
Modelo RC	0,0681	0,0167	0,0009	0,013
Modelo Thévenin	0,0500	0,0101	0,0004	-0,016
Modelo PNGV	0,0675	0,0126	0,0005	-0,017
Modelo DP	0,0309	0,0047	0,00004	-0,005

Tabela 1 – Resultado estatístico do erro de cada modelo. Fonte: (HONGWEN HE; FAN, 2011)

2.2 TOPOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO

Para fazer o monitoramento das baterias, existem três principais topologias de BMS, sendo eles: centralizado (Figura 8), distribuído (Figura 9) e modular (Figura 10).

2.2.1 Centralizado

A topologia centralizado compreende um *hardware* central, o qual recebe o sinal de tensão e temperatura de todas as células. Essa topologia reduz o custo em *hardware*, diminui a manutenção e evita problemas de interferência de comunicação. Porém, por ficar afastado das células, aumenta as chances de ocorrer alguma falha de isolamento ou curto circuito, além de comprometer a medição durante o balanceamento devido às perdas nos longos fios.

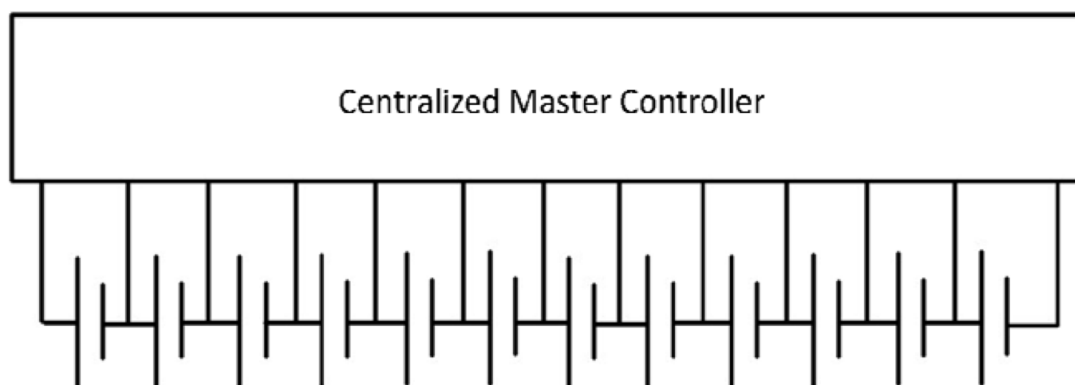


Figura 8 – BMS com topologia tipo centralizado. Fonte: (HU, 2011)

2.2.2 Distribuído

A topologia distribuído, é formado por um dispositivo de aquisição de dados para cada célula em série, que envia as informações adquiridas para um módulo central de processamento. Tem o custo mais elevado e maior dificuldade de manutenção, pelo fato de as células *Slave* ficarem dentro dos packs de bateria, porém é a topologia com maior precisão e menor sensibilidade a ruídos externo.

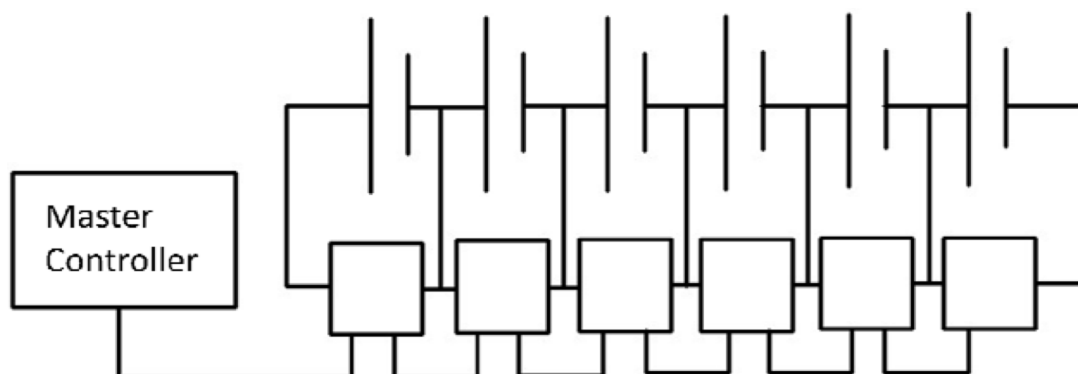


Figura 9 – BMS com topologia tipo distribuído. Fonte: (HU, 2011)

2.2.3 Modular

A topologia modular é um meio termo entre a distribuída e a centralizada, composta por BMS *Slaves* que adquirem informações de um certo número de células e enviam essa informação para o BMS *Master* fazer o processamento das informações e tomar as ações necessárias. Essa topologia tem a versatilidade de ser escalável e a vantagem de ser mais compacta e possibilitar a instalação mais próxima das células, o que melhora a medição da tensão, porém tem um custo mais elevado.

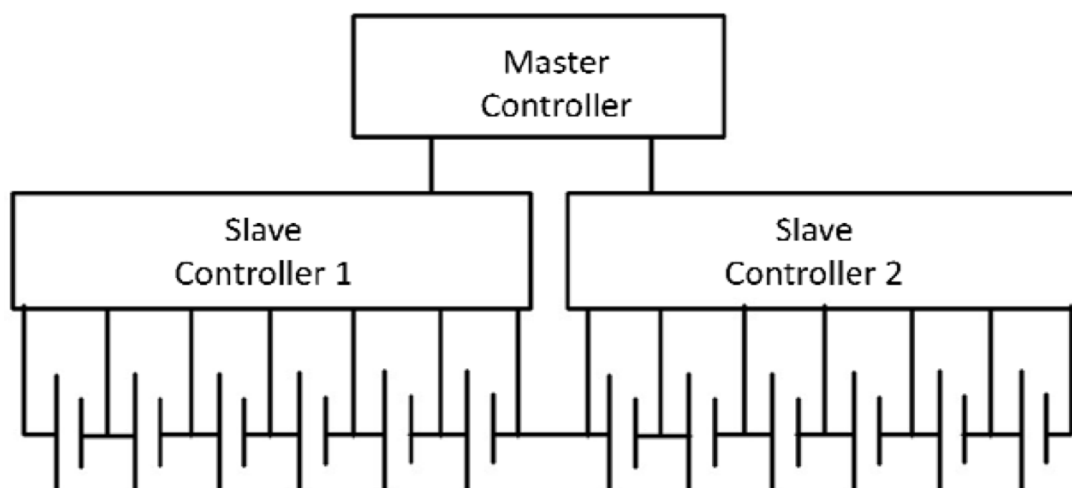


Figura 10 – BMS com topologia tipo modular. Fonte: (HU, 2011)

2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE

A medição da corrente instantânea é fundamental para a segurança da bateria e para o cálculo do SoC. Para realizar essa medição, utiliza-se basicamente dois métodos, o primeiro através de um sensor de efeito *Hall*, que detecta mudanças no campo magnético provocadas pela passagem da corrente. Já o segundo utiliza um *shunt*, que é um dispositivo de resistência conhecida e que gera uma queda de tensão ao passar a corrente por esse dispositivo, medindo essa tensão é possível calcular a corrente.

Historicamente sensores do tipo *shunt* são mais utilizados em aplicações de baixa corrente por causarem uma certa perda no sistema que é proporcional ao quadrado da corrente, logo, em correntes muito elevadas, essa perda seria muito grande. Porém são sensores muito mais precisos que os de efeito Hall, devido à necessidade de uma medição precisa para um bom gerenciamento das baterias, muitas montadoras estão começando a adotar essa tecnologia nos veículos elétricos (MANIAR, 2018).



Figura 11 – Sensor *shunt*.

Os sensores de efeito Hall mensuram a magnitude do campo magnético causado pela corrente que circula no condutor em questão, usando como princípio o efeito Hall. A tensão que surge nos polos é proporcional a intensidade do campo magnético que,

por sua vez, é proporcional a corrente que circula no condutor.

Esse princípio é utilizado também em sensores de proximidade, posicionamento e velocidade. Nesses casos o sensor é utilizado em combinação com um *threshold detection* para agir como uma chave digital.

A vantagem de se utilizar o sensor Hall é que por fazer uma medição indireta através do campo magnético, essa medição não interfere no funcionamento do sistema e o sinal é galvanicamente isolado.

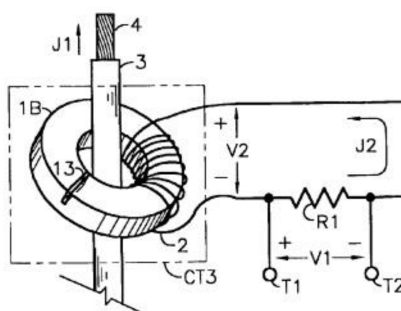


Figura 12 – Medição por efeito Hall.

2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Um fator crucial para a bateria é a sua temperatura de operação. A maior parte das baterias tem a sua temperatura de operação entre 0°C e 55°C . Para fazer essa medição existem diversas soluções utilizadas na indústria como termistores, termopares, sensor infra vermelho, entre outros.

2.4.1 Termistor

O termistor é um resistor que tem a sua resistência muito dependente da temperatura e essa variação pode se dar de duas formas, no caso do NTC (do inglês *Negative Temperature Coefficient*) que tem a sua resistência reduzida com o aumento da temperatura, e o PTC (do inglês *Positive Temperature Coefficient*) tem a sua resistência aumentada com o aumento da temperatura.

O valor típico da faixa de operação dos termistores em geral é de -55°C a 150°C, porém esse valor e a curva (resistência x temperatura) é específica de cada modelo e cada fabricante.



Figura 13 – Termistor PTC.

2.4.2 Termopar

O termopar também é um sensor de temperatura muito utilizado, ele é constituído de dois metais condutores diferente e unidos na ponta onde se faz a medição da temperatura. A medição se dá pelo surgimento da tensão entre as duas extremidades que estão separadas, essa tensão é proporcional à temperatura.

Os termopares são simples e baratos, normalmente vem com conectores padrão pronto para uso. Uma das vantagens do termopar é que ele não precisa de uma fonte de tensão, visto que gera a própria tensão em relação a temperatura. O ponto negativo é que eles não são muito precisos e não tem um desempenho muito bom em ambientes com muito ruído e interferência eletromagnética.



Figura 14 – Termopar.

2.4.3 Infravermelho

Termômetros infravermelhos ou termômetros sem contato estão ganhando popularidade atualmente na area médica devido às suas vantagens. É possível medir a temperatura corporal sem colocar o dispositivo em contato com a pele, assim a chance de infecção por doenças transmissíveis é facilmente reduzida.

O seu funcionamento consiste essencialmente em uma lente para focar a radiação térmica infravermelha em um detector, que converte a energia radiante em um

sinal elétrico que pode ser exibido em unidades de temperatura após ser compensado pela temperatura ambiente, normalmente esses sensores possuem um laser embutido para demonstrar para o usuário qual é o ponto focal do sensor, por esse motivo também são chamados de sensores laser. Um termômetro infravermelho sem contato é útil para medir a temperatura em circunstâncias em que termopares ou outros sensores do tipo sonda não podem ser usados ou não produzem dados precisos por vários motivos.

Às vezes, especialmente perto da temperatura ambiente, as leituras podem estar sujeitas a erros devido ao reflexo da radiação de um corpo mais quente em vez de irradiada pelo objeto sendo medido e para uma emissividade incorretamente assumida.



Figura 15 – Infravermelho.

2.5 MÉTODOS DE EQUALIZAÇÃO DE ENERGIA

O balanceamento de energia é uma função muito importante do BMS, conforme comentado anteriormente, devido a desvios de fabricação as células de bateria necessitam de um circuito de equalização de carga e a bateria acaba sendo limitada pela célula que está menos carregada. Existem diversas topologias de circuitos que podem ser utilizadas no balanceamento de carga (DAOWD *et al.*, 2014) para permitir que a bateria entregue a máxima energia possível. Essas topologias se dividem em dois grandes grupos: balanceamento não dissipativo e balanceamento dissipativo.

2.5.1 Princípio do balanceamento dissipativo

O balanceamento dissipativo é o método mais utilizado pois é um circuito de baixa complexidade e baixo custo, o método baseia-se na dissipação da energia em um resistor na forma de calor, basicamente, jogando fora a energia das células mais carregadas para permitir continuar carregando as demais células, esse circuito só tem funcionalidade durante a carga, e não incrementa em nada durante a descarga da bateria.

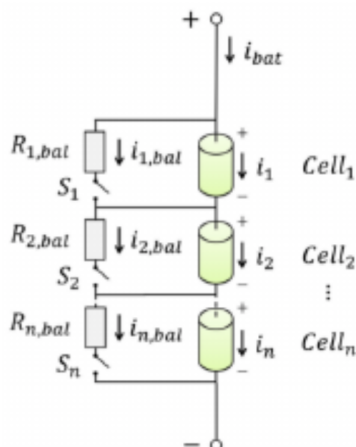


Figura 16 – Topologia de balanceamento dissipativo. Fonte: (DAOWD *et al.*, 2014)

2.5.2 Princípio do balanceamento não dissipativo

Já o balanceamento não dissipativo é equalização através da transferência de energia de uma célula para a outra, devido a essa transferência de energia, o sistema consegue melhorar o desempenho tanto da carga quando descarga de um banco de baterias, essa transferência de energia entre as células pode ser feita de varias formas como através de circuitos com capacitores chaveados, indutores ou conversor CC-CC.

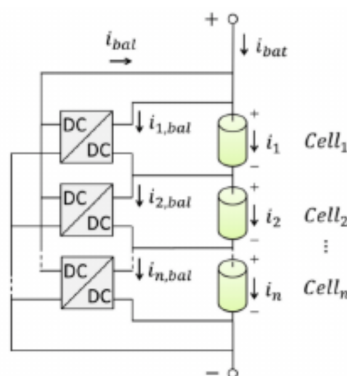


Figura 17 – Topologia de balanceamento não dissipativo. Fonte: (DAOWD *et al.*, 2014)

2.6 FILTRO DE KALMAN

O filtro de Kalman é um algoritmo matemático muito utilizado no processamento de sinais, sistemas de controle e navegação, para realizar a fusão de dados e a predição do estado de sistemas dinâmicos. Com a sua primeira utilização na década de 60, o filtro leva esse nome devido a um de seus criadores, o húngaro Rudolf Emil Kálmán.

Hoje em dia, além de ter a sua principal aplicação em sistemas de navegação e posicionamento espacial, o filtro de Kalman possui outras aplicações em diversas áreas do conhecimento, como predição de valores do mercado financeiro, sistemas de

navegação, sistemas de controle de tráfego aéreo e previsão de estado de carga de baterias.

O filtro de Kalman assume que o estado de um sistema no tempo t é devido ao seu estado anterior $t - 1$, de acordo com as equações 1 e 2.

$$x_t = A_t \cdot x_{t-1} + B_t \cdot u_t + w_t \quad (1)$$

$$z_t = H_t \cdot x_t + D_t \cdot u_t + v_t \quad (2)$$

Onde:

- x_t é o vetor de estado do sistema no tempo t ;
- u_t é o vetor das variáveis de entrada do sistema (valores medidos) no tempo t ;
- w_t é o vetor que contém os termos de perturbação ou ruído do processo para cada parâmetro no vetor de estado. Entrada não mensurável que afeta o estado do sistema.
- z_t é o vetor dos valores medidos;
- v_t é o ruído na leitura do sinal, que polui a medição;
- A_t é a matriz de transição de estado que aplica, o efeito do vetor de variável de interesse no sistema no tempo $t - 1$, no estado do sistema no tempo t ;
- B_t é a matriz de controle que aplica, o efeito das variáveis de controle u_t , no vetor de estado do sistema;
- H_t é a matriz de transformação que mapeia os parâmetros do vetor de estado para o domínio de medição

A equação 1 é a “equação de estado”, que descreve como o estado evolui ao longo do tempo. A segunda equação é a “equação de saída” que descreve como a saída medida se relaciona com o estado.

O verdadeiro estado do sistema x_t não pode ser observado diretamente, e o filtro de Kalman fornece um algoritmo para determinar uma estimativa \hat{x}_t combinando modelos do sistema e medições ruidosas de certos parâmetros ou funções lineares de parâmetros. As estimativas dos parâmetros de interesse no vetor de estado são, portanto, agora fornecidas por funções de densidade de probabilidade (pdfs), em vez de valores discretos. O filtro de Kalman é baseado em pdfs gaussianas. Para descrever completamente as funções gaussianas, precisamos saber suas

variâncias e covariâncias, e estas são armazenadas na matriz de covariâncias P_t . Os termos ao longo da diagonal principal de P_t são as variâncias associadas aos termos correspondentes no vetor de estado. Os termos fora da diagonal de P_t fornecem as covariâncias entre os termos no vetor de estado. No caso de um sistema linear unidimensional bem modelado com erros de medição extraídos de uma distribuição Gaussiana de média zero, o filtro de Kalman mostrou ser o estimador ideal. (FARAGHER, 2012)

O algoritmo possui dois estágios: predição e correção. As equações do filtro de Kalman para predição são:

$$\hat{x}_{t|t-1} = A_t \cdot \hat{x}_{t-1|t-1} + B_t \cdot u_t \quad (3)$$

$$P_{t|t-1} = A_t \cdot P_{t-1|t-1} \cdot A_t^T + Q_t \quad (4)$$

Onde Q_t é a matriz de covariância associada ao ruído das variáveis de entrada. A Equação (4) pode ser encontrado da seguinte forma: variância associada à predição $\hat{x}_{t|t-1}$ de um valor verdadeiro desconhecido x_t é dada por:

$$P_{t|t-1} = E[(x_t - \hat{x}_{t|t-1}) \cdot (x_t - \hat{x}_{t|t-1})^T] \quad (5)$$

Fazendo a diferença entre as Equações (1) e (3), obtém-se:

$$x_t - \hat{x}_{t|t-1} = A_t \cdot (x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1}) + w_t \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{t|t-1} &= E[(A_t \cdot (x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1}) + w_t) \cdot (A_t \cdot (x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1}) + w_t)^T] \\ &= A_t \cdot E[(x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1}) \cdot (x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1})^T] \cdot A_t^T \\ &\quad + A_t \cdot E[(x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1}) \cdot w_t^T] + E[w_t \cdot (x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1})^T] \cdot A_t^T \\ &\quad + A_t [w_t \cdot w_t^T] \end{aligned} \quad (7)$$

Observando que os erros de estimativa de estado e o ruído do processo não são correlacionados, tem-se:

$$E[(x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1}) \cdot w_t^T] = E[w_t \cdot (x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1})^T] = 0 \quad (8)$$

$$P_{t|t-1} = A_t \cdot E[(x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1}) \cdot (x_{t-1} - \hat{x}_{t-1|t-1})^T] \cdot A_t^T + A_t [w_t \cdot w_t^T] \quad (9)$$

$$P_{t|t-1} = A_t \cdot P_{t-1|t-1} \cdot A_t^T + Q_t \quad (10)$$

As equações de atualização do estado e covariância são dados por:

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t \cdot (z_t - H_t \cdot \hat{x}_{t|t-1}) \quad (11)$$

$$P_{t|t} = P_{t|t-1} - K_t \cdot H_t \cdot P_{t|t-1} \quad (12)$$

Onde K_t é chamado de ganho de Kalman e definido por:

$$k_t = \frac{P_{t|t-1} \cdot H_t^T}{H_t \cdot P_{t|t-1} \cdot H_t^T + R_t} \quad (13)$$

A Tabela 2 apresenta as funções de predição e atualização utilizadas no algoritmo de Kalman.

Equações de propagação
$\hat{x}_{t t-1} = A_t \cdot \hat{x}_{t-1 t-1} + B_t \cdot u_t$ $P_{t t-1} = A_t \cdot P_{t-1 t-1} \cdot A_t^T + Q_t$
Equações de atualização
$k_t = \frac{P_{t t-1} \cdot H_t^T}{H_t \cdot P_{t t-1} \cdot H_t^T + R_t}$ $\hat{x}_{t t} = \hat{x}_{t t-1} + K_t \cdot (z_t - H_t \cdot \hat{x}_{t t-1})$ $P_{t t} = P_{t t-1} - K_t \cdot H_t \cdot P_{t t-1}$

Tabela 2 – Equações do algoritmo de Kalman.

2.7 PROTOCOLO DA COMUNICAÇÃO CAN

O CAN (*Controller Area Network*) é um protocolo de comunicação, relativamente novo, começou a ser desenvolvido em 1983 pela Bosch e lançado oficialmente em 1986 na conferência de Detroit da SAE (Society of Automotive Engineers) ([SAE INTERNATIONAL](#), s.d.[a]), teve a sua primeira aplicação no Mercedes-Benz W140 em 1991.

O protocolo permite com que diversos microcontroladores se comuniquem sem a necessidade de um moderador do barramento, é definido pela norma ISO 11898. A comunicação funciona por meio de broadcast na qual, todos os componentes conectados na rede, conseguem ler toda e qualquer mensagem enviada no barramento, não sendo possível fazer comunicação ponto a ponto, sendo assim é necessário se

configurar um filtro no *hardware* para que leia apenas as informações que se deseja e descarte as demais.

Por se tratar de uma comunicação difusa, as mensagens precisam ter alguma identificação para que os componente na rede saibam o que estão lendo e quem está enviando a mensagem, para isso o protocolo segue um padrão de organização das informações a serem transmitidas. Conforme demonstrado na imagem abaixo, os bits enviados podem ser, basicamente, divididos em 3 grupos, bits de controle (DLC, IDE e CRC), bits de dados (*Data Field*) e bits de identificação (*Identifier*).

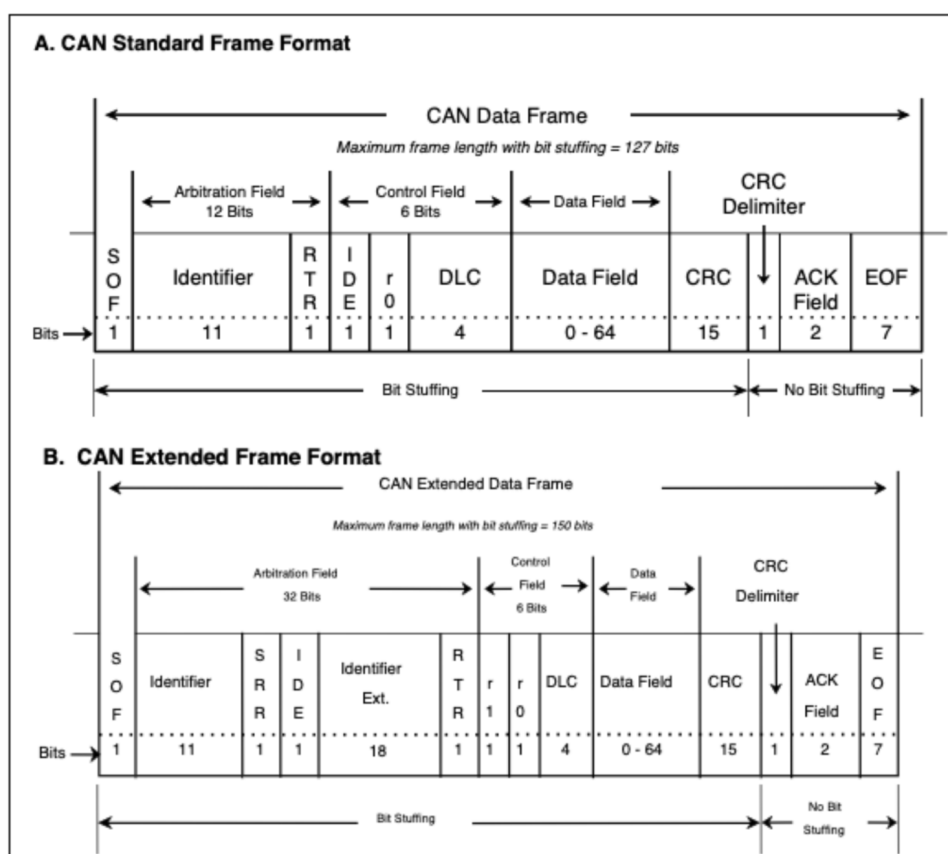


Figura 18 – Bitmap CAN. Fonte: (SAE INTERNATIONAL, s.d.[b])

O campo DLC (*Data Length Code*) possui 4 bits e representa o número de bytes que compõe o campo de dados, esse tamanho pode variar de 1 a 8 bytes. O bit RTR (*Remote Transmission Request*) define se a mensagem enviada contém algum dado, ou se é uma solicitação de informação, ou seja, RTR = 1 quer dizer que alguém está solicitando uma informação que possui a identificação enviada, e RTR = 0 quer dizer que a mensagem possui alguma informação a ser lida.

O campo de identificação da mensagem pode ter dois tamanhos diferentes e é regido pelo bit IDE (*ID Extended*), que diz se o tamanho do campo de identificação é do formato padrão e possui 11 bits (IDE = 0), ou se é no formato estendido que possui 29 bits (IDE = 1).

Para garantir a interoperabilidade de todos os componentes que utilizam o protocolo CAN em um veículo, a SAE elaborou a normativa SAE J1939/71 e J1939/73 que define os dados específicos contidos em cada mensagem enviada pela rede e o seu ID, a norma utiliza o formato estendido e a taxa de comunicação de 250 kbits/s ou 500 kbits/s. Conforme demonstrado na figura 19, o campo de identificação é subdividido em três grupos, onde os três primeiros bits definem a prioridade da mensagem, os últimos 8 bits identifica quem está enviando a mensagem, os demais bits são denominados de Número do Grupo de Parâmetros (PGN - *Parameter Group Number*) é valor de 18 bits tabelado conforme a norma J1939. (KVASER, s.d.)

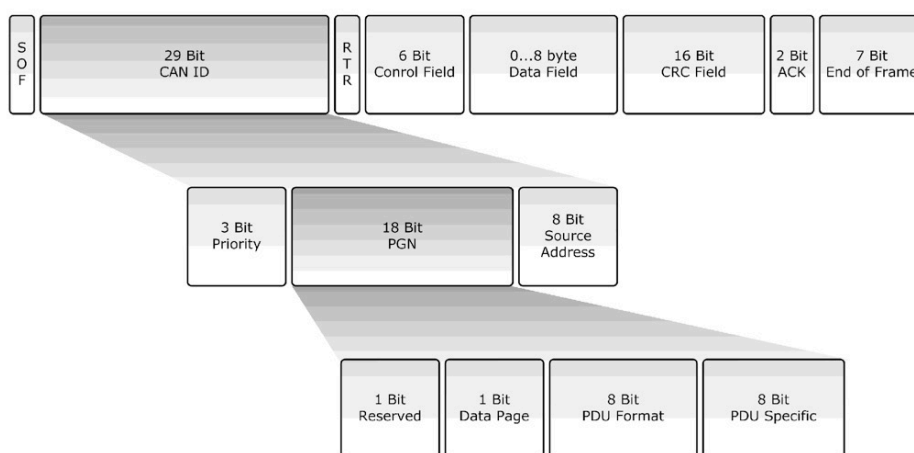


Figura 19 – Padrão SAE J1939/71 para o ID. Fonte: (KVASER, s.d.)

Os bits de prioridades são usados para controlar a prioridade de uma mensagem durante o processo de arbitragem, o valor 0 representa a prioridade mais alta. Valores de prioridade mais altos são normalmente dados a mensagens de controle de alta velocidade, por exemplo, a mensagem de controle de torque e velocidade do motor. As mensagens que contêm dados que não são críticos em termos de tempo, como infoentretenimento, recebem valores de prioridade mais baixos.

Para o campo PGN, o primeiro bit é reservado para uso futuro e deve ser definido como 0. O próximo bit é o seletor de página de dados. Este bit expande o número de grupos de parâmetros possíveis que podem ser representados pelo identificador.

PGN	Transmission Rate	Name	Description	Data Range	Resolution	Offset	Units
64937	On request	Network Signal Strength 1	Indicates the signal strength for the wireless communications network type.	0 to 100 %	0.4 %/bit	0	%
64937	On request	Wireless Communication Network Type 1	Type of Wireless Communication Network 0 = Cellular network #1 1 = Cellular network #2 2 = Wireless LAN #1 3 = Wireless LAN #2 4 = Satellite network 5-250 = Reserved for Future Assignment 251-253 = Reserved 254 = Error 255 = Not Available	0 to 255	256 states/8 bit	0	bit
64938	500 ms	Engine Charge Air Cooler 1 Inlet Pressure	Pressure of air at inlet to 1st or only charge air cooler, from multiple first stage turbochargers being cooled and feeding multiple second stage turbochargers.	0 to 500 kPa	2 kPa/bit	0	kPa
64938	500 ms	Engine Charge Air Cooler 2 Inlet Pressure	Pressure of air at inlet to 2nd charge air cooler, from multiple first stage turbochargers being cooled and feeding multiple second stage turbochargers.	0 to 500 kPa	2 kPa/bit	0	kPa
64938	500 ms	Engine Coolant Pump Differential Pressure	The differential pressure measured across the input and output of the engine coolant pump.	-7 to 403 kPa	1.64 kPa/bit	-7	kPa
64938	500 ms	Engine Centrifugal Oil Filter speed	The speed of a rotating (centrifugal) engine oil filter.	0 to 257,020 rpm	4 rpm/bit	0	rpm
64938	500 ms	Engine Intercooler Coolant Level	Ratio of volume of liquid found in an engine intercooler cooling system to total engine intercooler cooling system volume.	0 to 100 %	0.4 %/bit	0	%
64938	500 ms	Engine Aftercooler Coolant Level	Ratio of aftercooler coolant system volume of liquid to total cooling system volume. The engine aftercooler coolant level is for the low temperature (LT) cooling circuit used for the compressor outlet air or charge aftercooling. SPN 111 "Coolant Level" is assumed to represent a high temperature (HT) cooling circuit used for cooling the engine and its various components.	0 to 100 %	0.4 %/bit	0	%
64938	500 ms	Engine Charge Air Cooler Outlet Pressure	Measures pressure of air at outlet from charge air cooler	0 to 500 kPa	2 kPa/bit	0	kPa

Figura 20 – Tabela SAE J1939/71.

Parte II

Implementação

3 MODELAGEM DAS CÉLULAS

Considerando os resultados do estudo apresentado e os objetivos mencionados no início deste documento, optou-se por utilizar o modelo Thévenin por ser um modelo com baixo erro e simples de se obter os parâmetros necessários para o circuito.

Iniciou-se o modelamento com um ensaio de descarga completa da célula, para a obtenção da curva de tensão em circuito aberto (OCV - *Open Cell Voltage*) por SoC. Para realizar o ensaio, primeiramente a célula de bateria foi carregada até a sua capacidade máxima conforme a folha de dados, ou seja, até que a sua tensão chegar a um valor de 3,6 V e então descarregada até 2,5 V. Depois realizou-se um ensaio de descarga pulsada seguindo o primeiro ensaio a bateria foi carregada até 3,6 V e depois seguiu-se com o ensaio até atingir 2,5 V, para obter os parâmetros da rede RC que regem o comportamento dinâmico da bateria.

Para a realização dos ensaios, contratou-se o laboratório Lactec(LACTEC, s.d.), especializado em testes em baterias. Os ensaios foram realizados com 3 células distintas, para cada célula realizou-se os ensaios em diferentes temperaturas para observar a variação dos parâmetros da bateria em relação ao SoC e a temperatura.

3.1 MODELO ELÉTRICO DA BATERIA

Conforme explicado anteriormente, o primeiro ensaio realizado foi o ensaio de descarga para adquirir a curva de estado de carga por tensão em circuito aberto. Durante o ensaio anotou-se os valores de tensão, corrente e temperatura no mesmo instante de tempo para posteriormente serem utilizados no modelamento, conforme o exemplo de resultados entre as Figuras 21 até 23, implementadas em uma das células com temperatura controlada de 35 °C.

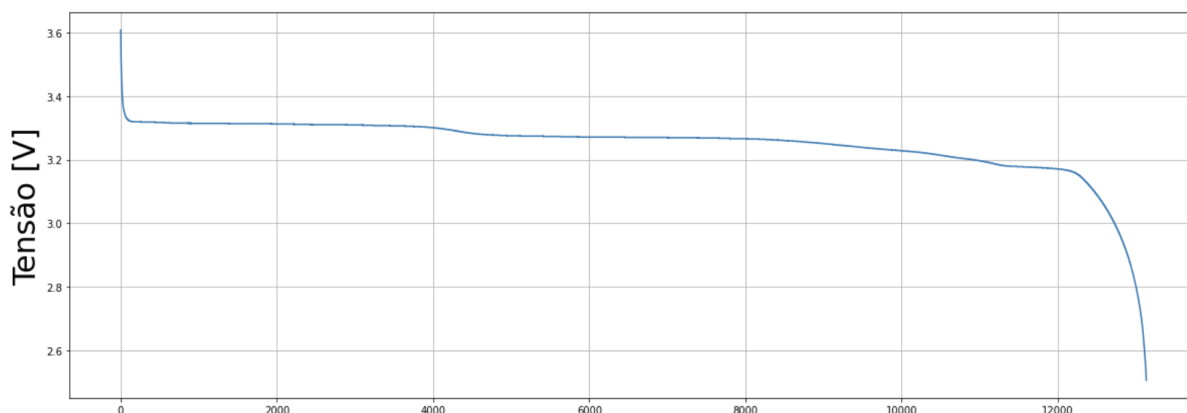


Figura 21 – Curva experimental tensão da célula. Fonte: Autor (2021)

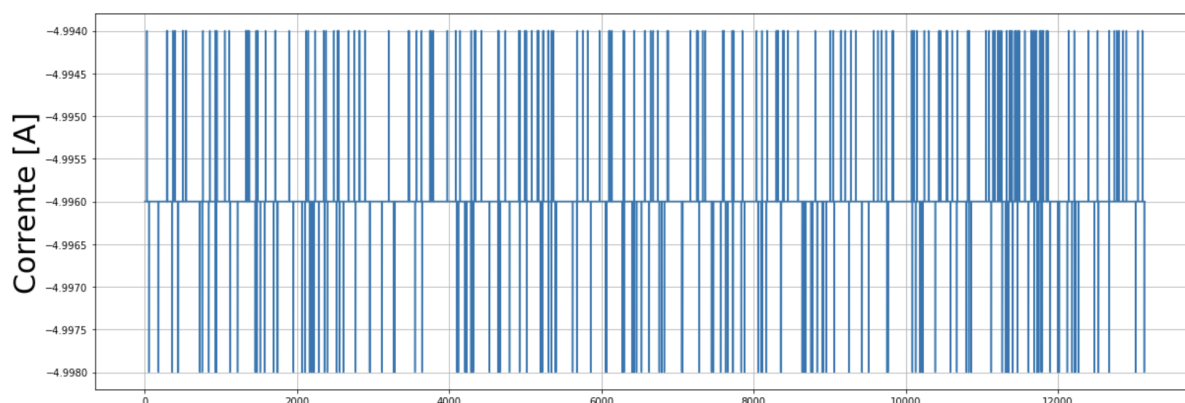


Figura 22 – Curva experimental de corrente de descarga. Fonte: Autor (2021)

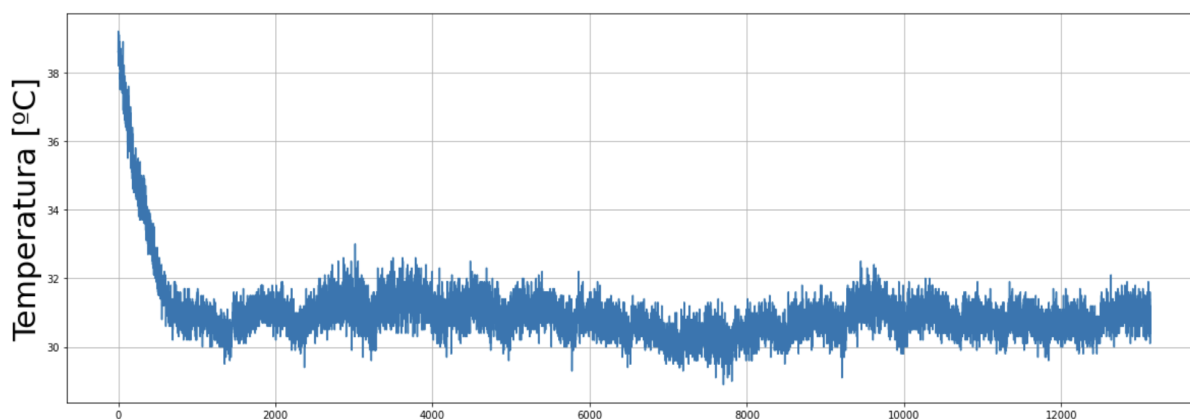


Figura 23 – Curva experimental de temperatura da célula. Fonte: Autor (2021)

Com a finalidade de diminuir o efeito da queda de tensão provocada pela resistência interna da célula e dos condutores, foi utilizado uma corrente de descarga de 5 A, o que é relativamente baixo para uma bateria de 90 Ah. O ensaio demorou aproximadamente 18 horas para cada temperatura e foi utilizado uma taxa de aquisição de uma amostra a cada cinco segundo, as baterias foram colocadas em um ambiente de temperatura controlada e o ensaio seguiu-se no intervalo de 0°C a 55°C com o passo de 5°C e foi repetido com cada uma das três células conforme mostrado os dados de temperatura na Figura 24.

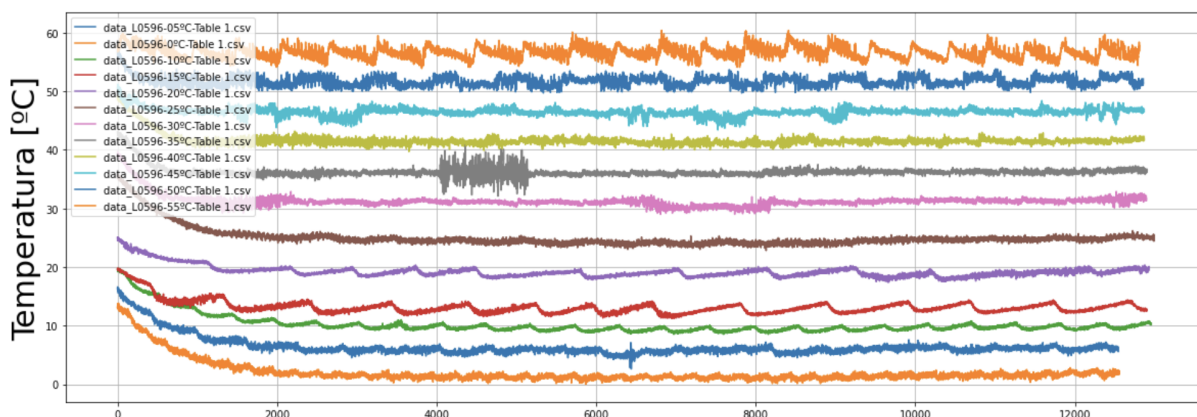


Figura 24 – Temperatura da célula durante ensaio de descarga. Fonte: Autor (2021)

Com os dados de corrente e tensão e, sabendo que todos os ensaios foram iniciados com a célula em 100% estado de carga, integrou-se a corrente para fazer o cruzamento do valor de SOC por OCV, resultando nos seguintes gráficos das figuras 25, 26 e 27:

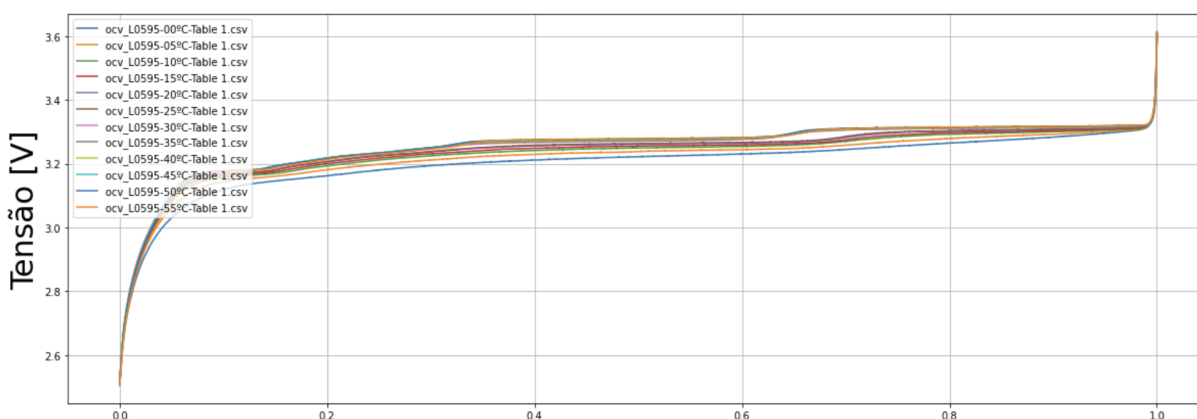


Figura 25 – Curva experimental de OCV x SoC da célula 1. Fonte: Autor (2021)

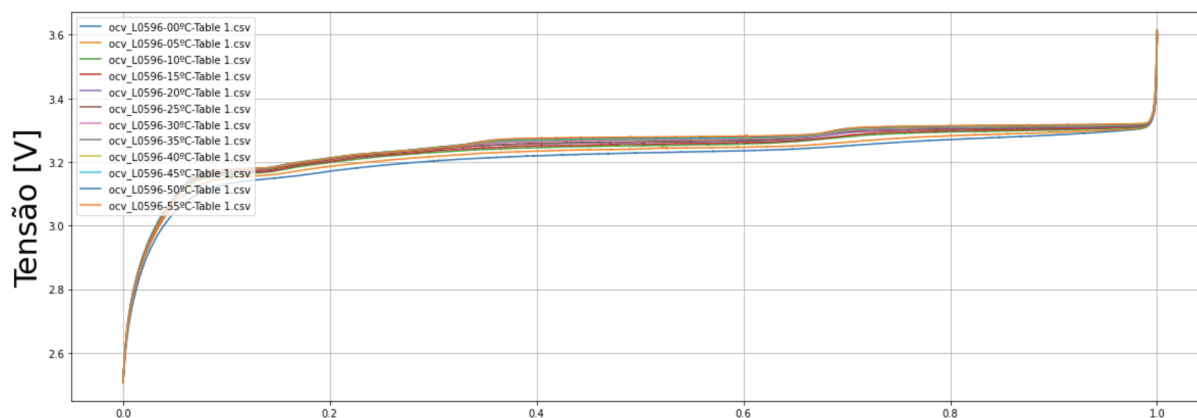


Figura 26 – Curva experimental de OCV x SoC da célula 2. Fonte: Autor (2021)

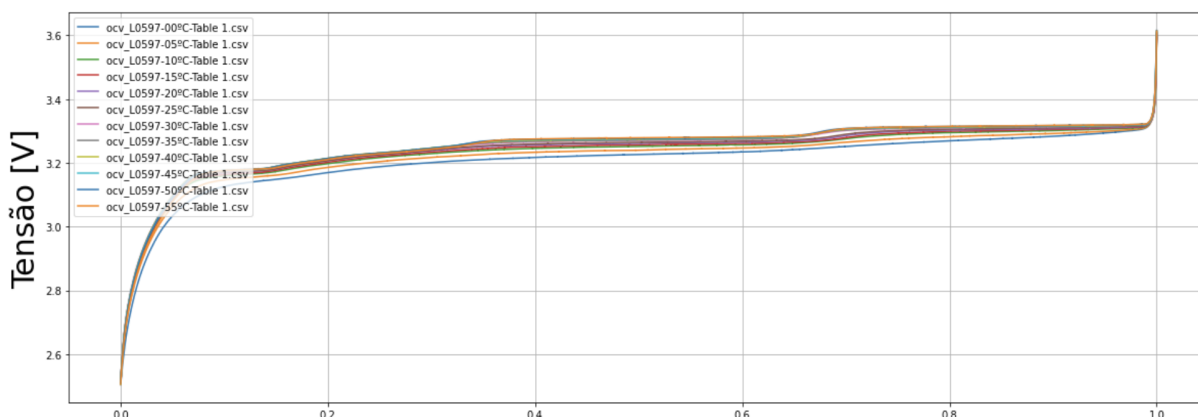


Figura 27 – Curva experimental de OCV x SoC da célula 3. Fonte: Autor (2021)

Aproximando mais o gráfico é possível observar a diferença das curvas de OCV para cada faixa de temperatura conforme mostrado na Figura 28.

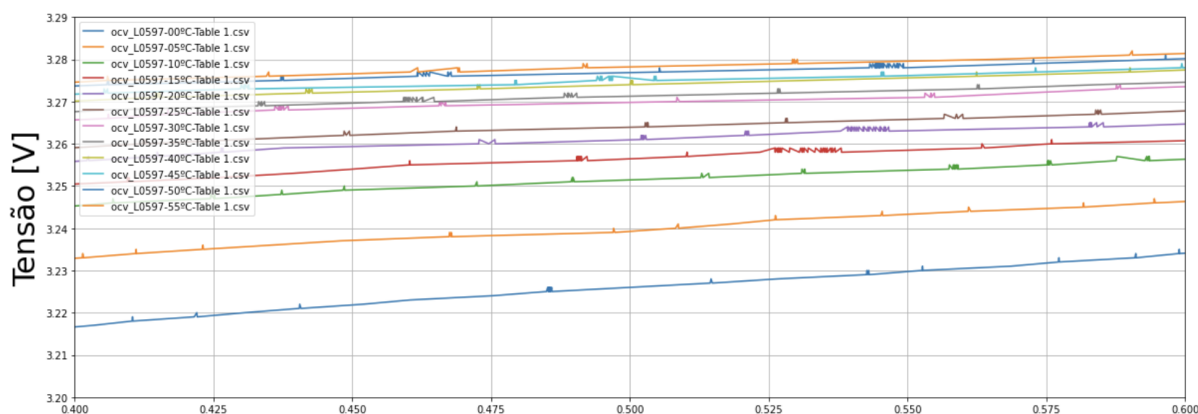


Figura 28 – Variação da curva de OCV em função da temperatura. Fonte: Autor (2021)

Após a obtenção da curva de OCV por SoC, iniciou-se a modelagem dos parâmetros da célula para estimar a tensão de circuito aberto da célula com base na tensão medida nos terminais da mesma. Para isso utilizou-se o ensaio sugerido por Plett (2018) conforme a Figura 29.

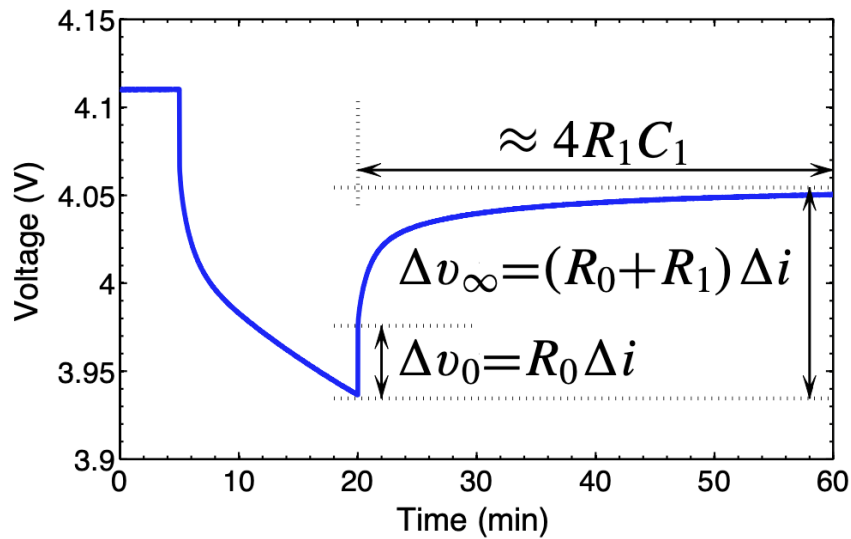


Figura 29 – Formulas para cálculo dos parâmetros (PLETT, 2018)

Extraindo as equações na Figura 29, chega-se nas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \Delta V_0 &= R_0 \cdot \Delta i \\ R_0 &= \Delta V_0 / \Delta i \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_\infty &= (R_0 + R_1) \cdot \Delta i \\ R_1 &= (\Delta V_\infty / \Delta i) - R_0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta t &= 4 \cdot R_1 \cdot C_1 \\ C_1 &= \Delta t / (4 \cdot R_1) \end{aligned} \quad (16)$$

Observando a curva da Figura 29, extrai-se os seguintes valores ΔV_0 , Δi , Δt e ΔV_∞ , aplicando esses valores encontrados nas equações 14, 15, 16, encontra-se os parâmetros do circuito equivalente R_0 , R_1 e C_1 .

Porém, sabendo que os parâmetros da bateria variam com a temperatura e o SoC, optou-se por realizar um ensaio com corrente pulsada, iniciando com uma corrente de 45 amperes, a bateria foi descarregada por aproximadamente 12 minutos e depois a carga foi removida e mantido em repouso por mais 12 minutos e repetiu-se esse procedimento até que a tensão da célula atingisse 2,5 V. Então repetiu-se esse ensaio para as temperaturas de 15 °C, 30 °C e 45 °C e observou-se o comportamento da tensão nos terminais da bateria conforme a Figura 30:

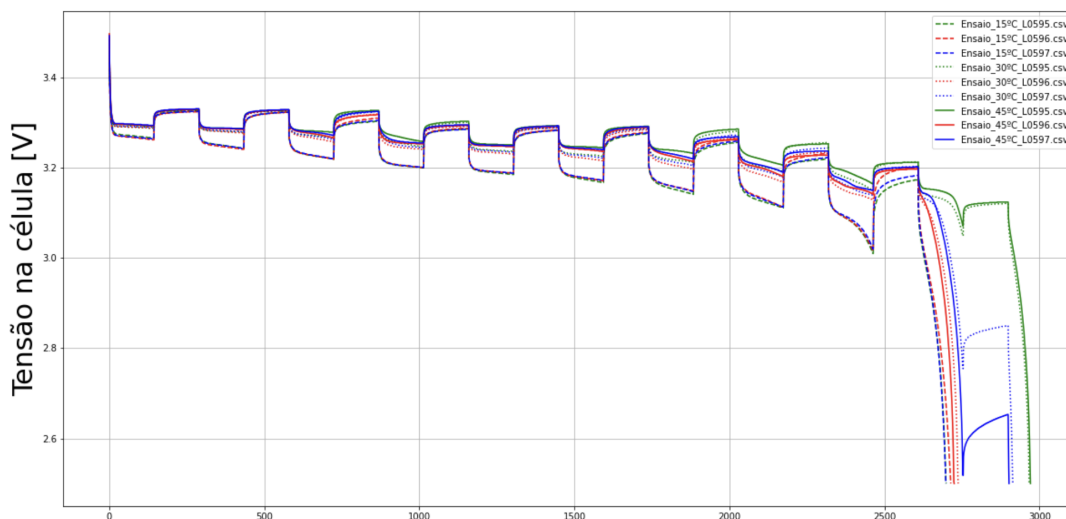


Figura 30 – Tensão em ensaio de descarga pulsada de 45 A. Fonte: Autor (2021)

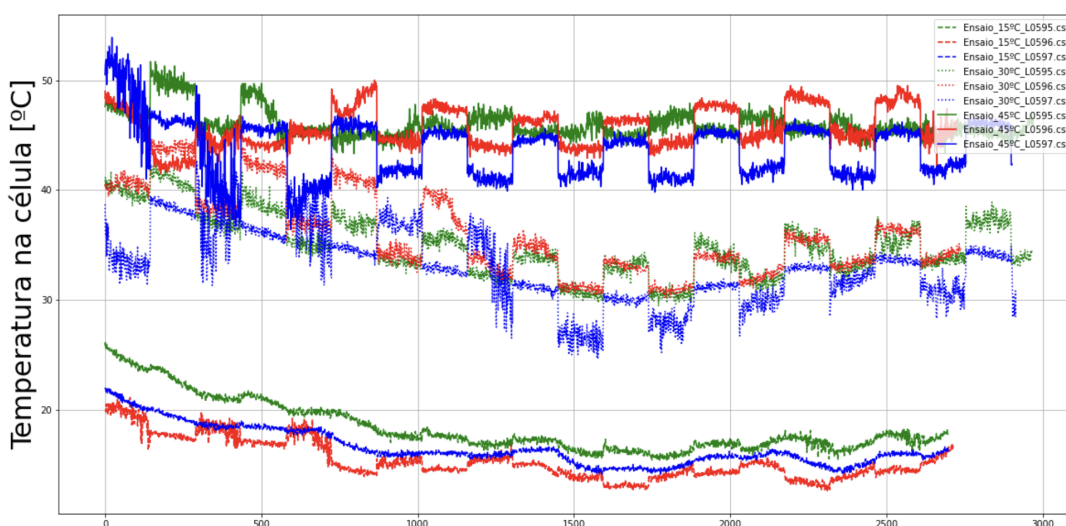


Figura 31 – Temperatura em ensaio de descarga pulsada de 45 A. Fonte: Autor (2021)

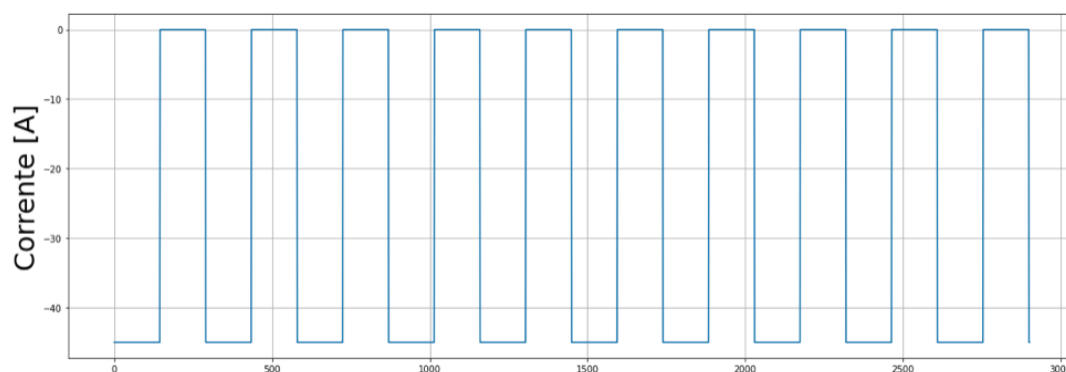


Figura 32 – Pulso de corrente de 45 A aplicados ao ensaio de descarga. Fonte: Autor (2021)

Com os ensaios realizados, primeiramente extraiu-se o parâmetro de resistência interna da célula para isso, utilizou-se a queda de tensão causada no instante seguinte a aplicação ou remoção da carga, sabendo a variação de tensão e corrente e que $V = R.i$, temos que a resistência interna da célula $R_0 = \Delta V / \Delta i$, a Figura 33 apresenta os valores de resistência interna obtidos em relação a temperatura e estado de carga para cada uma das células ensaiadas.

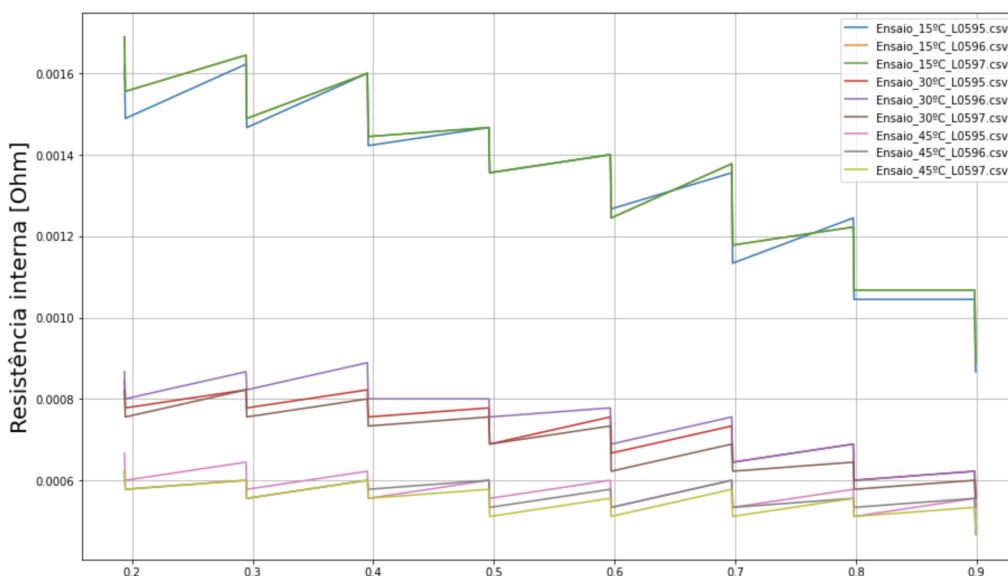


Figura 33 – Pontos experimentais de resistência interna em função do SoC. Fonte: Autor (2021)

Com os dados obtidos no ensaio acima, percebe-se que a variação da resistência interna tem uma dependência, aproximadamente, linear em relação ao SoC. Então realizou-se a interpolação dos pontos obtidos a fim de obter a reta que represente a média das medidas para cada temperatura, obtendo as curvas da Figura 34.

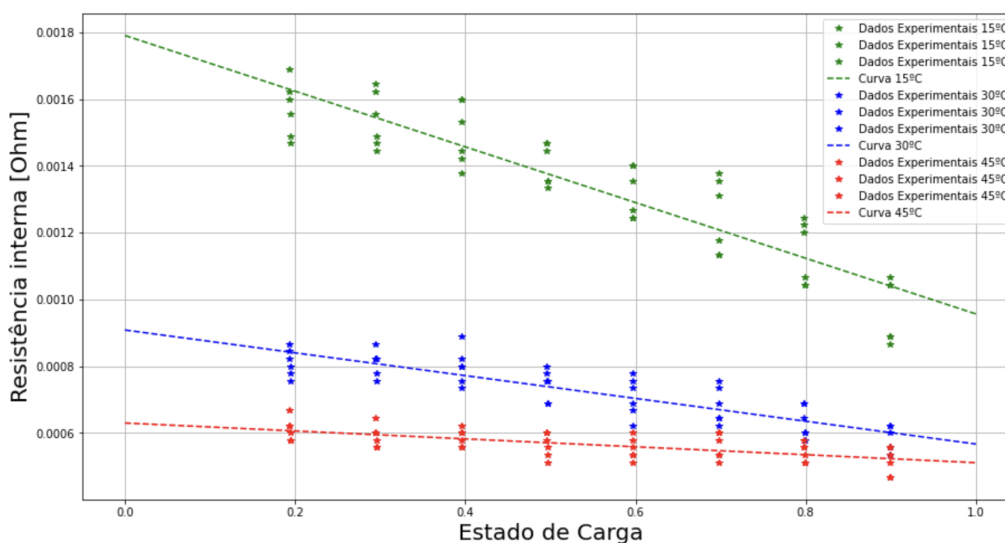


Figura 34 – Curvas de resistência interna em função do SoC. Fonte: Autor (2021)

Da curva da Figura 34 obteve-se as equações 17 para 15°C, 18 para 30°C e 19 para 45°C

$$R_0 = -0,0008348.SoC + 0,0017911 \quad [\Omega] \quad (17)$$

$$R_0 = -0,0003418.SoC + 0,0009082 \quad [\Omega] \quad (18)$$

$$R_0 = -0,0001189.SoC + 0,0006294 \quad [\Omega] \quad (19)$$

Plotando as três equações em um gráfico com três dimensões conforme a Figura 35, percebe-se que a variação da resistência interna é exponencialmente proporcional à temperatura. Com isso modelou-se a equação da resistência interna conforme a fórmula (20).

$$R_0(SoC, T) = a.SoC.exp(c.T + d) + b.exp(e.T + f) + g \quad (20)$$

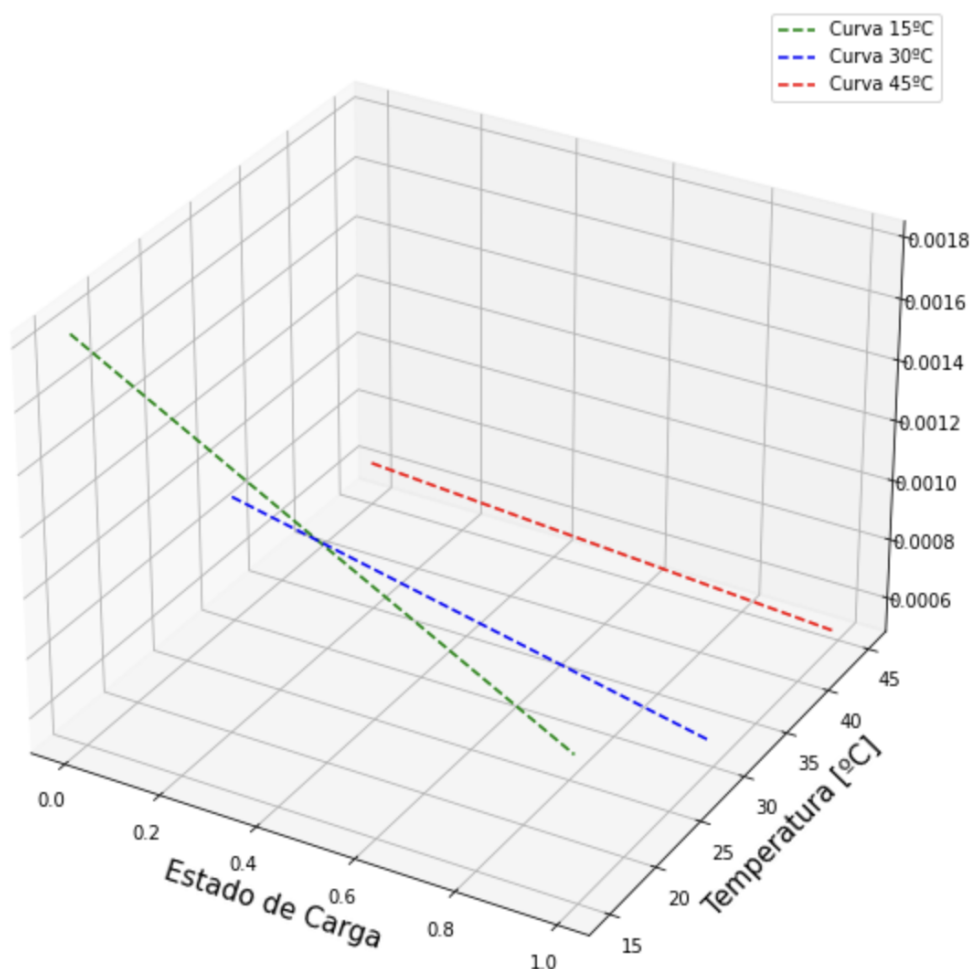


Figura 35 – Curvas de resistência interna por temperatura e SoC. Fonte: Autor (2021)

Aplicou-se as curvas encontradas a função “curve_fit” da biblioteca “scipy.optimize” para encontrar as variáveis da equação, com isso obteve-se a equação 21 para o valor de R_0 . A equação apresenta um erro relativo médio de 2,8% e um erro relativo máximo de 6% quando comparado às retas extraídas dos pontos experimentais.

$$\begin{aligned} R_0(SoC, T) = & -0,14 \cdot SoC \cdot \exp(-0,059 \cdot T - 4,2) \\ & + 1,1 \cdot \exp(-0,065 \cdot T - 5,7) \\ & + 0,00043 \end{aligned} \quad (21)$$

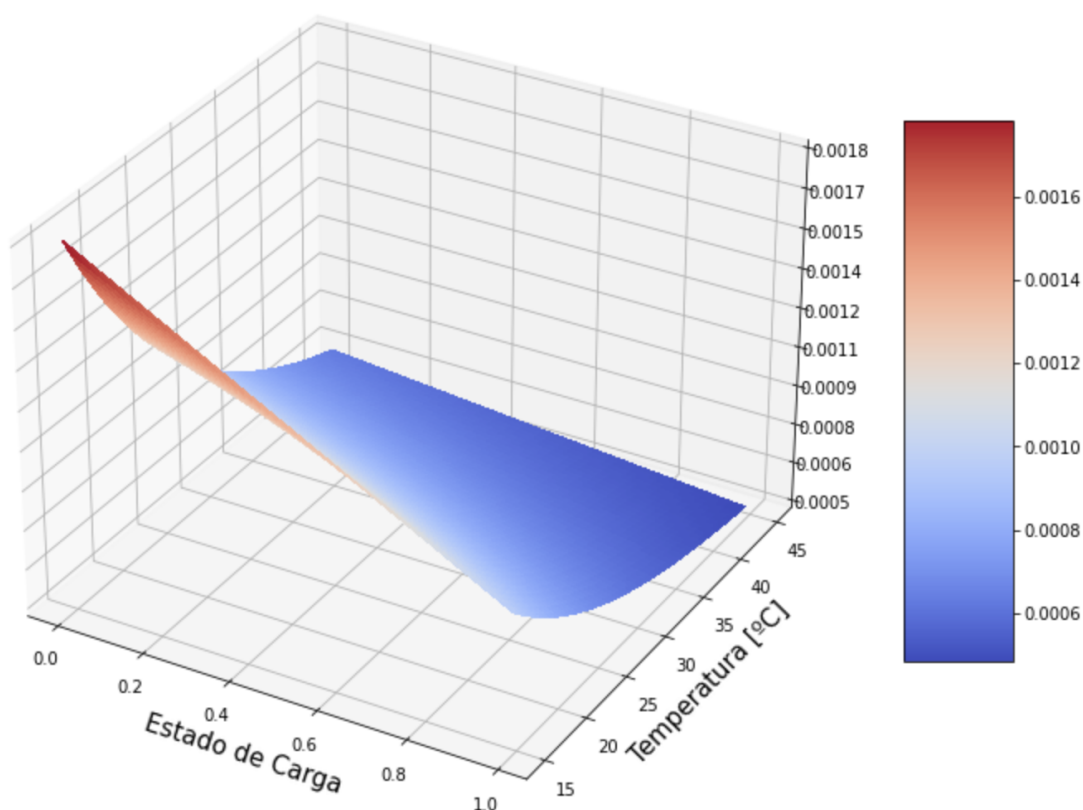


Figura 36 – Curva da resistência interna modelada. Fonte: Autor (2021)

Para a obtenção dos parâmetros da rede RC, utilizou-se a mesma estratégia da curva OCV e partiu-se para a modelagem matemática da célula, conforme mencionado anteriormente, optou-se por utilizar o modelo Thévenin por ser um modelo bem representativo e simples, a Figura 37 demonstra o modelo utilizado.

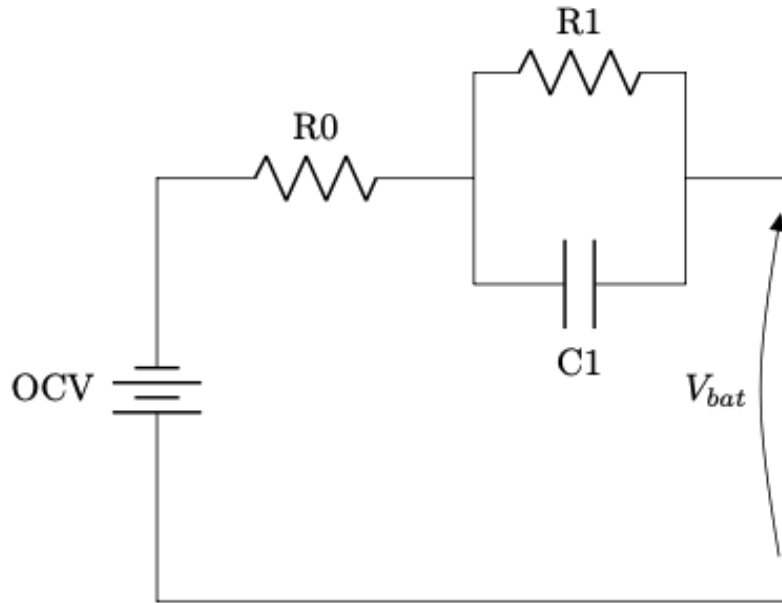


Figura 37 – Circuito equivalente. Fonte: Autor (2021)

Aplicando as Leis de Kirchhoff no circuito 37, temos que:

$$OCV(t) = Vbat(t) + R_1 \cdot I_{R_1}(t) + R_0 \cdot I(t) \quad (22)$$

$$I_{R_1}(t) + C_1 \cdot V_{C_1}(t) = I(t) \quad (23)$$

Sabendo que $V_{C_1}(t) = R_1 \cdot I_{R_1}(t)$, e aplicando na equação (23) e tem-se:

$$I_{R_1}(t) + C_1 \cdot R_1 \cdot \frac{dI_{R_1}(t)}{dt} = I(t) \quad (24)$$

$$\frac{dI_{R_1}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 \cdot C_1} \cdot I_{R_1}(t) + \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \cdot I(t) \quad (25)$$

Resolvendo a equação diferencial (25) no domínio discreto, temos a seguinte equação:

$$I_{R_1}[t] = I_{R_1}[t-1] \cdot e^{-\frac{\Delta t}{R_1 \cdot C_1}} + (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 \cdot C_1}}) \cdot I[t] \quad (26)$$

Resolvendo as equações (26) e (22), tem-se o valor de OCV da célula, e aplicando esse valor à curva de tensão em circuito aberto por estado de carga, tem-se o valor do SoC instantâneo da célula com base na tensão medida no contato da célula. Com as equações, montou-se o algoritmo para otimização dos parâmetros da bateria

utilizando a função “curve_fit” da biblioteca “scipy.optimize”. O código se encontra do apêndice C.

Os resultados encontrados pela função “curve_fit” estão demonstrados na Figura 38, onde apresenta a curva de descarga experimental (em azul) e o modelo gerado (em vermelho), na Figura 39 encontra-se o erro relativo do modelo em relação ao experimento.

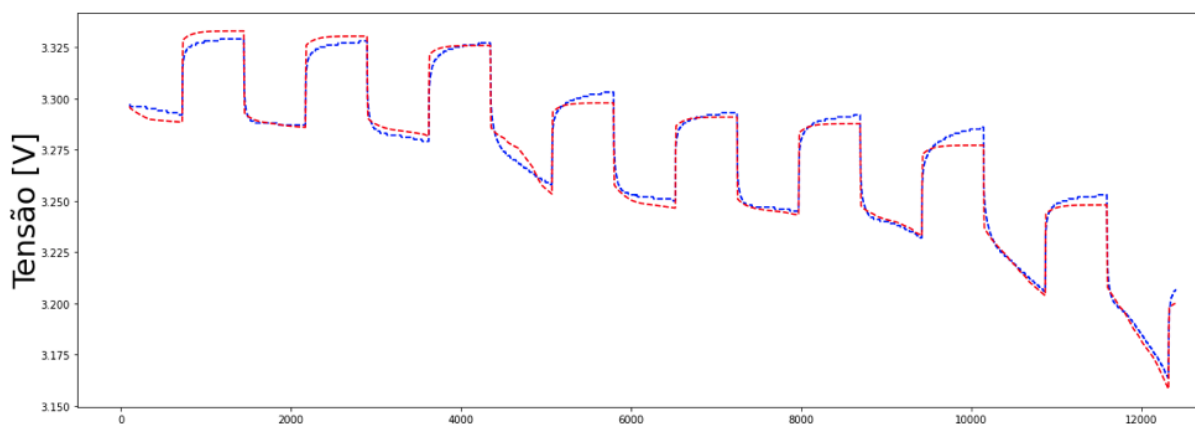


Figura 38 – Comparativo entre curva experimental e modelada. Fonte: Autor (2021)

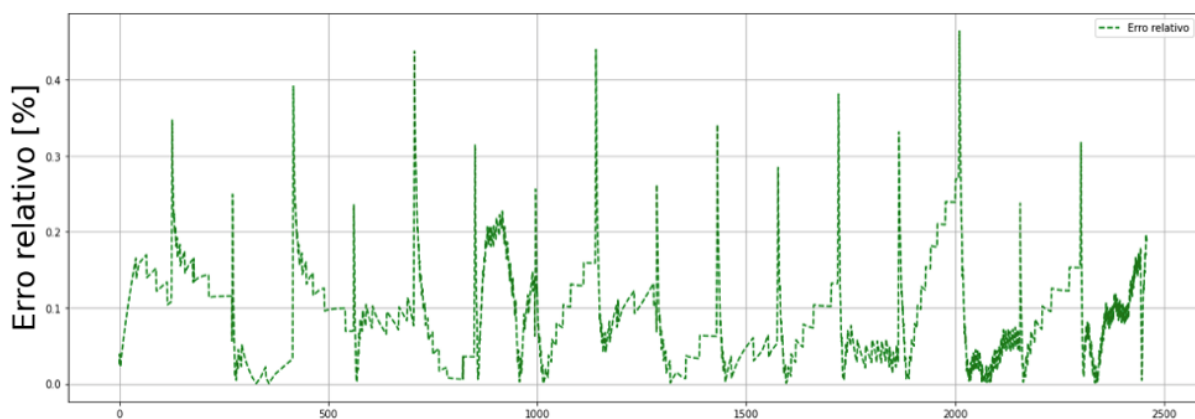


Figura 39 – Erro relativo do modelo encontrado. Fonte: Autor (2021)

O erro relativo médio do modelo foi de 0,09 % com um erro máximo de 0,46 %, tendo um modelo que representa o comportamento da célula, partiu-se então para a validação do modelo na estimativa do estado de carga.

Após isso, implementou-se o modelo desenvolvido e comparou com os dados experimentais, a Figura 40 mostra o comparativo entre o estado de carga real, a saída do modelo e a predição do filtro de Kalman, na Figura 42 está o erro relativo entre a estimativa do filtro de Kalman e o SoC real, obteve-se a um erro médio de 6,03% e um erro máximo de 26,86% menor quando comparado ao erro antes do modelo antes do filtro, que foi de 8,06% e 44,78%.

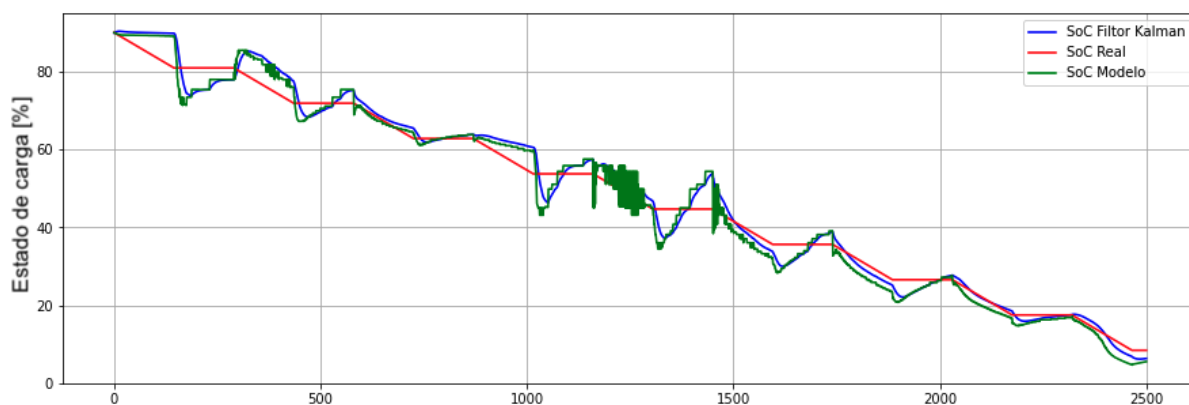


Figura 40 – Comparativo do SoC real e o estimado pelo modelo. Fonte: Autor (2021)

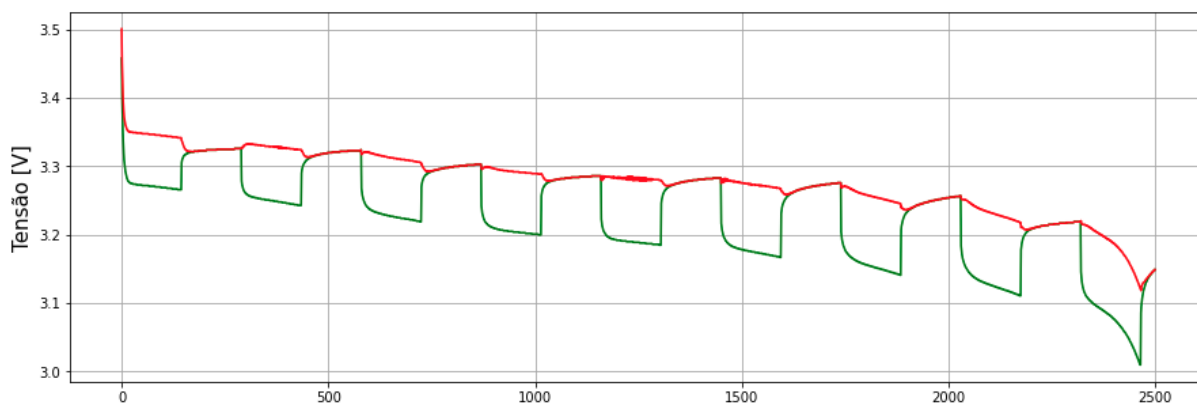


Figura 41 – Comparativo de tensão no terminal da célula e em circuito aberto. Fonte: Autor (2021)

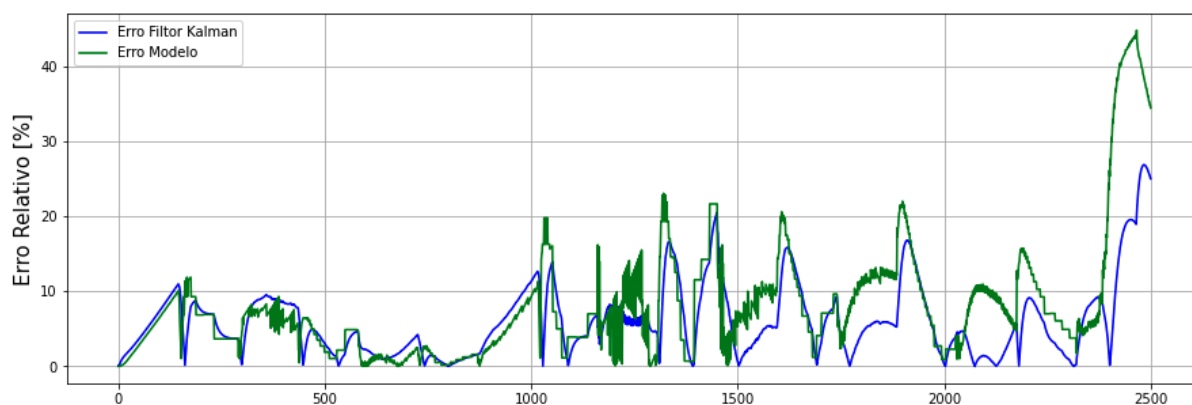


Figura 42 – Erro relativo para estimativa do SoC. Fonte: Autor (2021)

4 PROJETO DO ALGORITMO DE CONTROLE

Fazendo uso do comportamento da bateria expresso em fórmulas matemáticas, desenvolveu-se o algoritmo para fazer o controle do sistema. Foi escolhido uma frequência de 10 Hz para ciclo do código, ou seja, a cada 100 milissegundos são executadas todas as funções de aquisição e processamento de dados.

Visualizando o trecho de código abaixo, percebe-se que a base do algoritmo é composta por algumas funções de comunicação, cálculos de parâmetro interno e uma máquina de estados. A função “getData()” é responsável por adquirir todas as informações necessárias para a lógica de funcionamento do algoritmo, tais como sensor de corrente, sensor de tensão, informações da VCU do automóvel e as informações das células da bateria. Já a função “setFlags()” é responsável por calcular todos os sinais de controle utilizados no funcionamento do sistema, são com esses sinais que acionam todos os comandos do BMS. A Figura 43 demonstra o fluxograma do algoritmo.

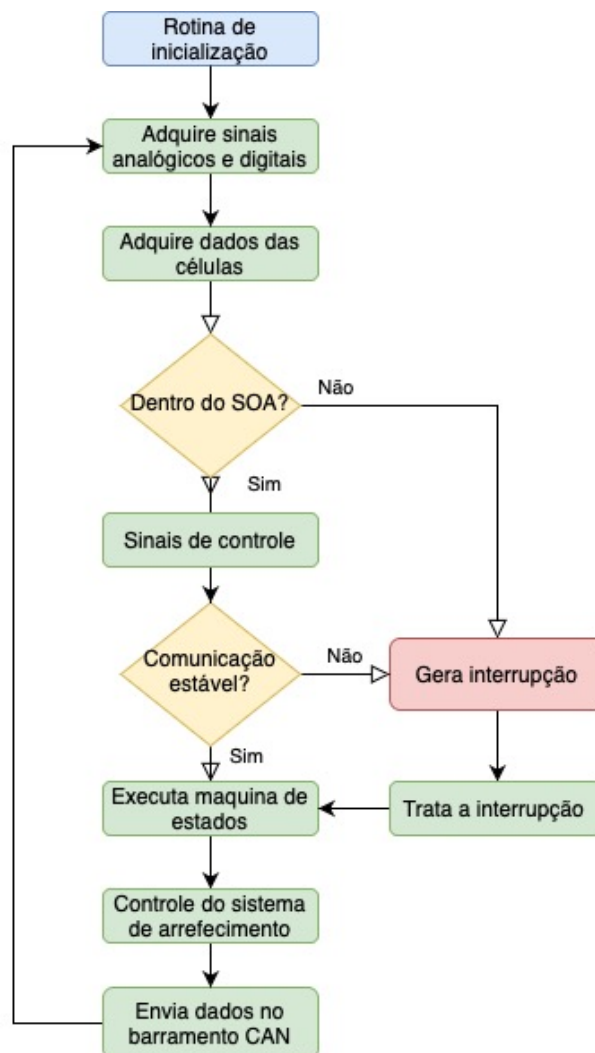


Figura 43 – Fluxograma do algoritmo de controle. Fonte: Autor (2021)

4.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para se fazer a leitura dos valores de tensão, primeiramente é enviado um comando, para que o LTC faça essa medição, através da função “readCellVoltage()”. Essa função faz com que o LTC salve os valores medidos em registradores internos e posteriormente é transmitido via comunicação SPI, e o tempo de leitura de todas as células é de aproximadamente 12 milissegundo.

A corrente é adquirida via entrada analógica do processador. São utilizados dois conversores analógico para digital e então é lido os dois valores do sensor Hall, um deles com uma faixa de -50 A a 50 A e outro com a faixa de -500 A a 500 A, assim tem-se uma é possível combinar uma boa precisão para baixa corrente e uma faixa de operação que atenda a todo o funcionamento da bateria.

Outras duas entradas analógicas são utilizadas para realizar o valor de tensão no barramento CC do inversor e a tensão total do banco de baterias, com isso é possível realizar o controle do pré carga dos capacitores do inversor, e garantir que não se tenha um pico de corrente ao inicializar o sistema.

4.2 LÓGICA DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DO BMS

Por se tratar de um sistema de segurança, grande parte da lógica do BMS consiste em garantir que todos os componentes estão operando dentro das condições de segurança, para isso algoritmo confere o estado de funcionamento.

O *watchdog* é um contador incremental utilizado para verificar a estabilidade da comunicação entre o BMS e a VCU, a cada passo do controle é comparado o valor recebido com o antigo, caso eles sejam iguais, indica que o valor não foi atualizado. Logo, existe a probabilidade de que se tenha algum problema na comunicação entre o BMS e VCU, caso essa condição perca por mais de dez ciclos, é gerado uma condição de falha e o sistema trata essa falha com as devidas medidas necessárias. A Figura 44 representa o fluxo de estados do *watchdog*.

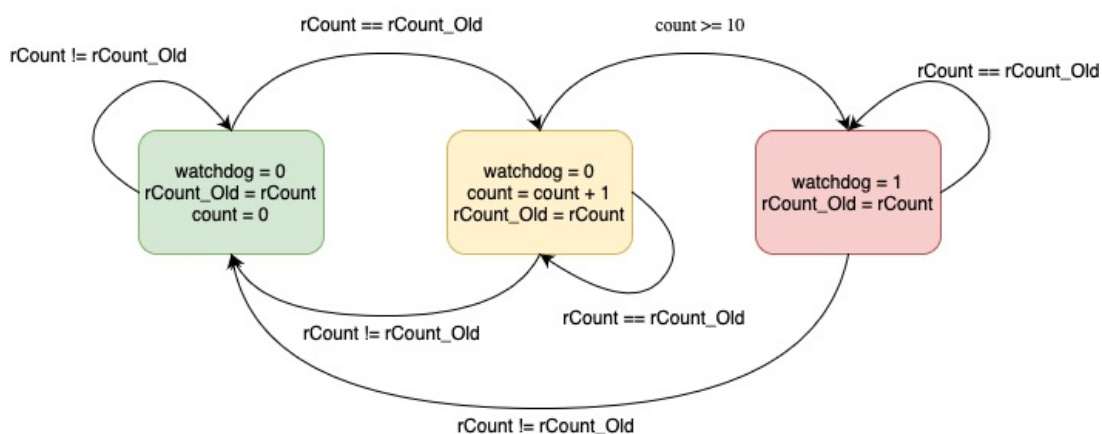


Figura 44 – Fluxograma do *watchdog*. Fonte: Autor (2021)

O BMS também controla o acionamento dos contatores da bateria, isso para se ter uma pré-carga dos capacitores do inversor. Para realizar esse controle, primeiramente é acionado um contator que possui uma resistência em série para limitar a corrente de carga dos capacitores, assim que a tensão entre o inversor e a bateria se equalizam, é acionado o segundo contator que curto-circuita o resistor, assim, removendo o resistor do circuito. A Figura 45 demonstra o fluxograma do acionamento dos contatores.

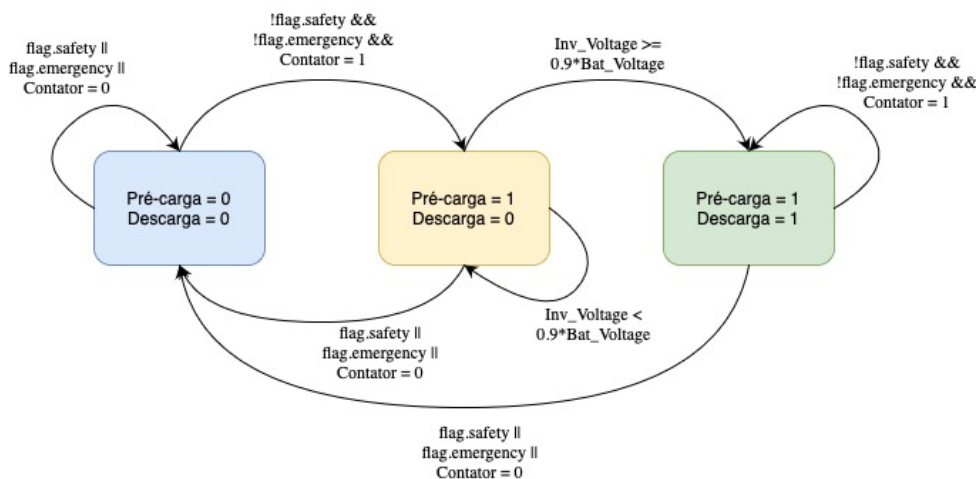


Figura 45 – Acionamento do contator. Fonte: Autor (2021)

O BMS também possui uma lógica simples para acionamento do sistema de arrefecimento, revisando os dados da bateria é possível observar que o seu melhor funcionamento é entre 25°C e 30°C, dessa forma escolheu-se essas temperaturas como pontos para acionamento do arrefecimento, segundo a lógica demonstrada na Figura 46.

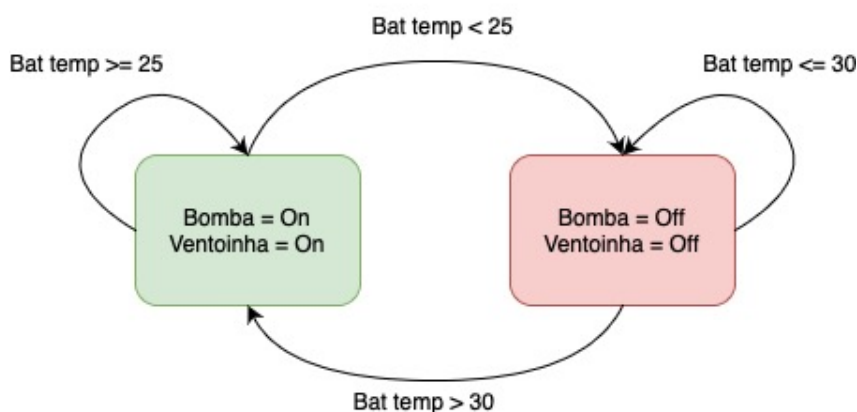


Figura 46 – Acionamento do sistema de arrefecimento. Fonte: Autor (2021)

Para verificar se a bateria está operando dentro da SOA, foi elaborada a função “safetyCheck()”. A função é responsável por verificar se todas as células estão operando dentro dos limites de tensão, temperatura e corrente recomendadas pelo fabricante da

bateria, além de realizar alguns cálculos que serão utilizados na estimativa do estado de carga da bateria.

A função também prove informações sobre o desbalanceamento das células e qual célula deve ter o resistor de descarga habilitado para balanceamento, tais como tensão da maior e menor célula, e a média das tensões das células. No apêndice encontra-se a implementação da função em linguagem C.

4.3 MÁQUINA DE ESTADOS

A máquina de estados é composta por cinco estados, o “EMERGENCY_STATE”, ou estado de emergência, é o estado em que o sistema opera quando identifica algum problema na bateria ou quando a a bateria começa a operar fora da região de segurança. O “OFF_STATE”, ou estado desligado, é um estado inicial do sistema, onde é feita toda a inicialização, também pode ser chamado após um estado de emergência forçando o desligamento do sistema. O “OPERATION_STATE”, ou estado de operação, é o estado em que a bateria está operando normalmente dentro de todos os parâmetros de segurança e conforme as requisições da VCU. O “CHARGING_STATE”, ou estado de carregamento, é o estado que realiza o controle de carregamento externo do veículo na rede elétrica. E o “IDLE_STATE”, ou estado de espera, é o estado em que o BMS identifica que está tudo correto e aguardando um comando da VCU para começar a operar. A Figura 47 demonstra graficamente a máquina de estado e suas transições.

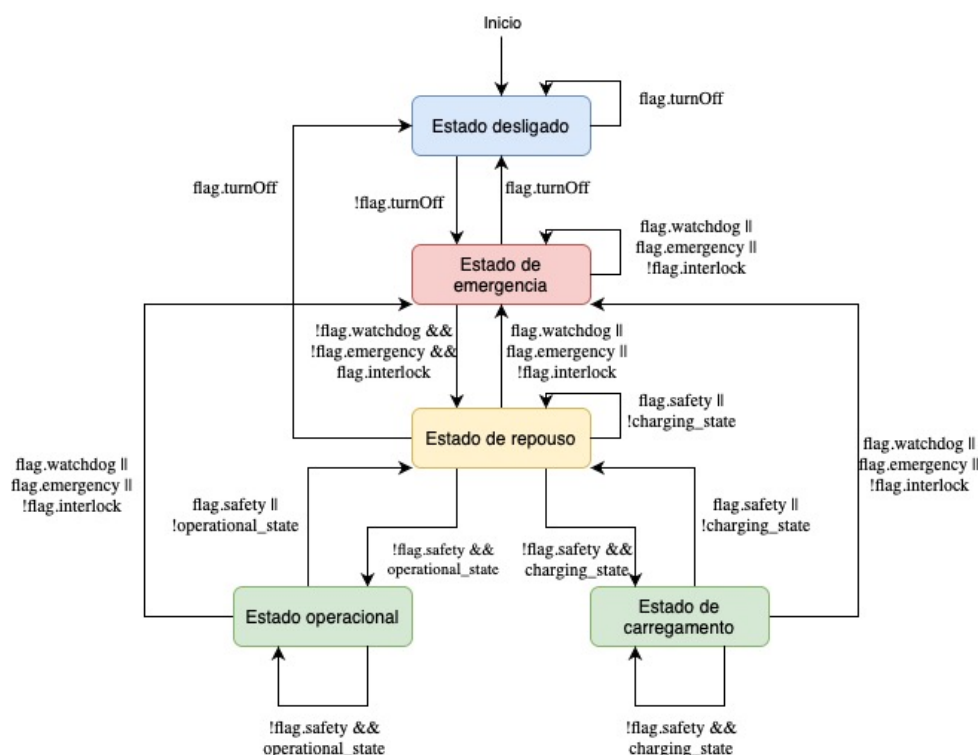


Figura 47 – Fluxograma da máquina de estados. Fonte: Autor (2021)

Os estados desligado e repouso são estados transitórios que apenas inicializam algumas variáveis e definem a condição de sinais de controle, o estado de emergência força a abertura dos contadores da bateria e envia uma mensagem de erro a VCU do veículo. O estado de carregamento deixou-se para implementações futuras, visto que a aplicação ainda não possui carregamento externo.

Dos estados citados acima, o estado operacional é o único que contém alguma lógica e merece uma explicação mais profunda, é neste estado onde é implementado o modelo da bateria responsável pelo cálculo do estado de carga, corrente máxima de carga e descarga.

O algoritmo inicia com o controle dos contadores, após isso é realizada a estimativa da tensão em circuito aberto de todas as células da bateria, essa estimativa é realizada através do modelo desenvolvido anteriormente, esse valor de OCV é então utilizado em uma *lookup table*, onde os dois valores mais próximos são selecionados, com isso é feita uma interpolação linear e então é encontrado o valor do estado de carga relativo a tensão em circuito aberto. Com o valor de SoC estimado pelo modelo, aplica-se no filtro de Kalman e então tem-se o valor final estimado do estado de carga da bateria.

Com o novo valor de estado de carga e temperatura das baterias, é realizado o cálculo das correntes limites de carga e descarga, e todas as informações atualizadas são enviadas a VCU do veículo.

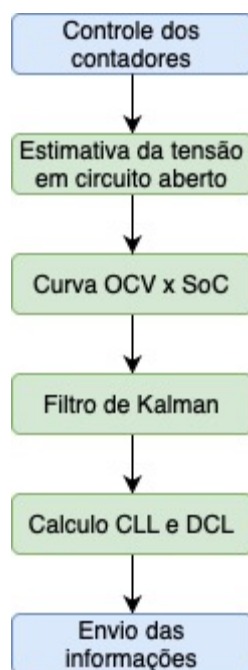


Figura 48 – Fluxograma da operação do BMS. Fonte: Autor (2021)

5 PROJETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO

5.1 TOPOLOGIA DO BMS

A bateria para o qual o projeto foi desenvolvido é da química LiFePO4 com capacidade nominal de 90 Ah, constituída por 11 módulos de 16 células em série cada uma, totalizando 176 células. Dessa forma optou-se por utilizar a topologia modular, por ser uma topologia mais versátil para a aplicação, reduzir os tamanhos dos cabos de medição, aumentar a segurança e confiabilidade do sistema, com menor inserção de ruídos e interferências.

No projeto dividiu-se o BMS em 22 unidades de aquisição, cada unidade é responsável por adquirir a tensão de 8 células e a temperatura em 5 pontos distintos do módulo de bateria.

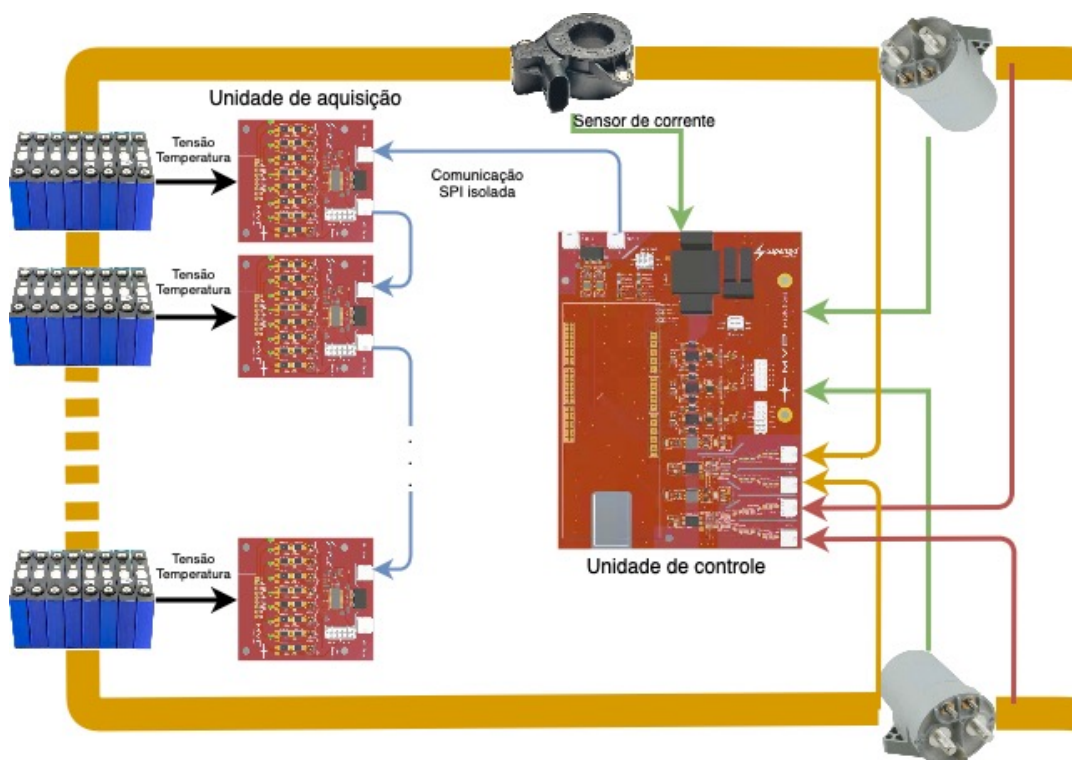


Figura 49 – Topologia modular escolhida para o projeto. Fonte: Autor (2021)

5.2 COMPONENTES E PARÂMETROS DE PROJETO

Existem uma variedade de componentes comerciais de diversos fabricantes que fazem a aquisição dos valores de tensão e temperatura das células, fabricantes como Texas Instruments, Analog Devices Inc., Microchip, STMicroeletronis entre outros. Para o projeto em questão foi utilizado o LTC6804 da Analog Devices, pois é um componente que já vem com qualificação automotiva AEC-Q100 e é desenvolvido para atender as normas de segurança automotiva imposta pelo ISO 26262.



Figura 50 – LTC6804 Analog Devices. ([LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION](#), s.d.[a])

Para a comunicação CAN foi escolhido o ISO 1042 da Texas Instruments, pois é um componente que atende às qualificações automotivas AEC-Q100 e possui proteções contra sobretensão no barramento CAN, o componente também possui isolamento galvânica de 1500 V entre o TX/RX Serial e o barramento CAN, o que garante uma maior robustez ao sistema.



Figura 51 – ISO1042 Texas Instruments. Fonte: ([TEXAS INSTRUMENTS](#), s.d.)

O sensor de corrente escolhido foi do tipo sensor de efeito Hall modelo DHAB S/124 da fabricante LEM, essa escolha se deu principalmente devido as altas correntes utilizadas pelo veículo em questão, superiores a 200 A, o que faz com que seja mais eficiente uma medição que não interfira no caminho da corrente, assim evitando perdas desnecessárias no sistema.



Figura 52 – Sensor de corrente por efeito Hall. Fonte: ([LEM INTERNATIONAL SA, s.d.](#))

Para a unidade de controle foi utilizado um kit de desenvolvimento MPC5748G com arquitetura PowerPC da NXP Semiconductors. O processador é utilizado para unidade de controles automotivas e possui qualificação automotiva e é qualificado para certificação ISO 26262 ASIL-C. O processador possui três núcleos, sendo dois com frequência de 160 MHz e o terceiro com 80 MHz, 8 canais de comunicação CAN, cinco canais SPI, conversores analógico digital de 12 bits, além de diversas entradas e saídas digitais.



Figura 53 – Kit de desenvolvimento MPC5748G. ([NXP SEMICONDUCTOR, s.d.](#))

5.3 PROJETO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Após a escolha de todas as topologias a serem utilizadas e cálculo de todos os parâmetros necessários, partiu-se para o desenvolvimento do esquemático dos circuitos, para essa parte do projeto foi utilizado o software Altium Design 2021 ([ALTIUM, s.d.](#)). No desenvolvimento dos circuitos buscou-se utilizar apenas

componentes com qualificação automotiva AECQ-100, AECQ-101, AECQ-200 e compatíveis com ISO26262.

5.3.1 Projeto unidade de controle

Conforme mencionado anteriormente, para a unidade de controle foi utilizado o kit de desenvolvimento MCP5748g da NXP, porém essa placa não possui a interface necessária para realizar as medidas necessárias. Para isso desenvolveu-se os circuitos analógicos para tratamento dos sinais e garantir a segurança de operação com a isolamento galvânica entre o microprocessador e os demais componentes do sistema.

5.3.1.1 Alimentação

Para a alimentação do circuito utilizou-se uma fonte isolada pronta da ABB Power Ele, o componente SHHD001A3B4Z com tensão de entrada de 18 V a 75 V e tensão de saída de 12 V. O componente possui isolamento de 2250 VDC e faixa de operação de -40°C a 85°C .

Por ser um sistema que opera em um local com um considerável ruído eletromagnético gerado por toda a unidade de tração, adicionou-se um filtro EMC à entrada da fonte conforme sugerido pelo próprio fabricante da fonte conforme demonstrado na Figura 54.

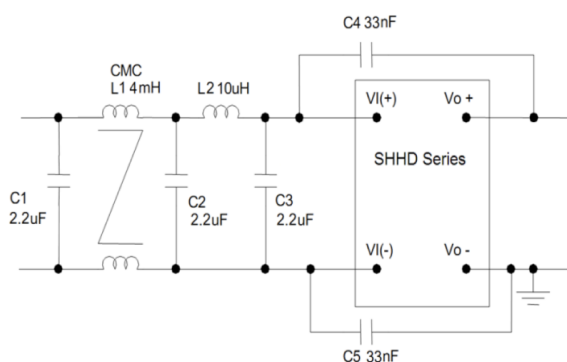


Figura 54 – Esquemático do filtro EMC. Fonte: (GENERAL ELECTRIC COMPANY, s.d.)

Também adicionou-se um circuito de proteção contra ligação invertida, utilizando os componentes LM74700 e SQ418EY-TI-GE3. A Figura 55 demonstra o circuito final da fonte de alimentação da unidade de controle, o pontilhado preto representa a isolamento galvânica do circuito.

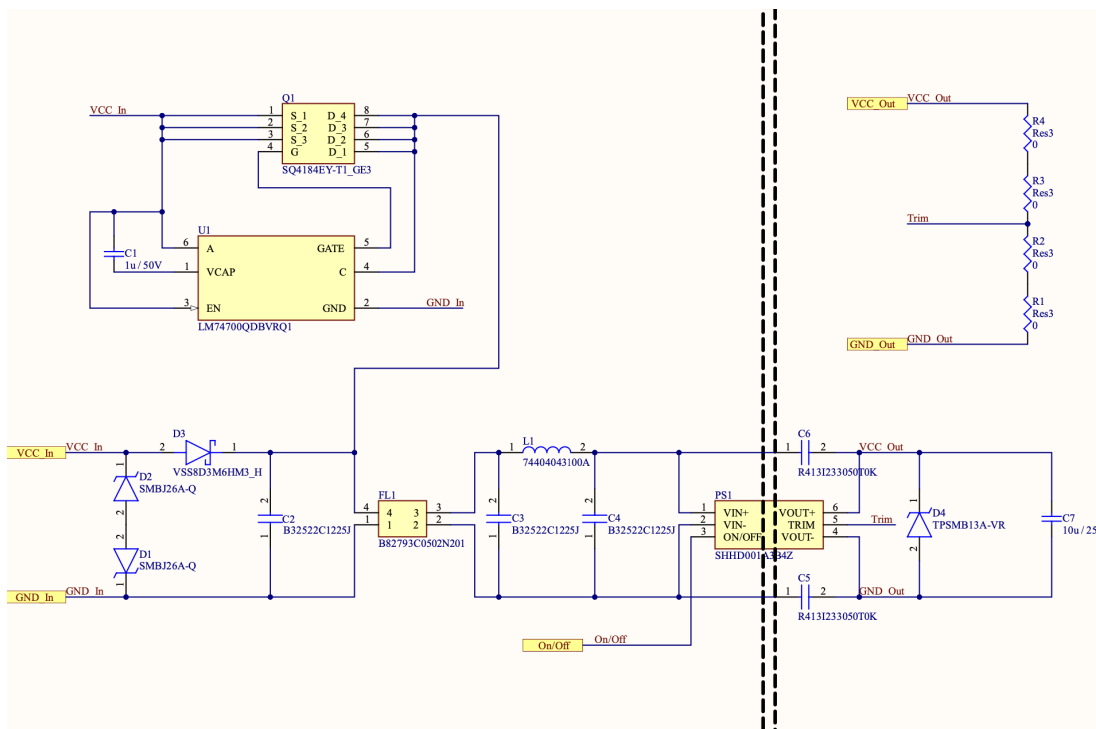


Figura 55 – Esquemático do circuito da fonte de alimentação. Fonte: Autor (2021)

5.3.1.2 Comunicação

Utilizando o ISO1042, adicionou-se alguns componentes de proteção como o e o indutor de modo comum, também adicionou-se dois relês de estado sólido para ter a opção de acionar o resistor de terminação CAN via software, assim facilitando a integração do BMS com os demais componentes do veículo.

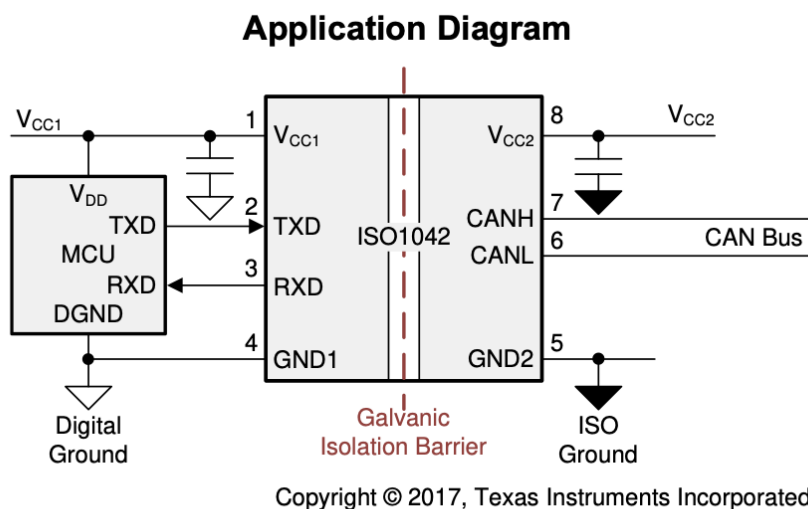


Figura 56 – Esquemático do circuito CAN. Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, s.d.)

Além da comunicação CAN, também é necessário a o protocolo SPI para comunicação com as unidades de aquisição. Para isso utilizou-se o componente LTC6820 da Linear Technology, que é um isolador para o protocolo de comunicação SPI.

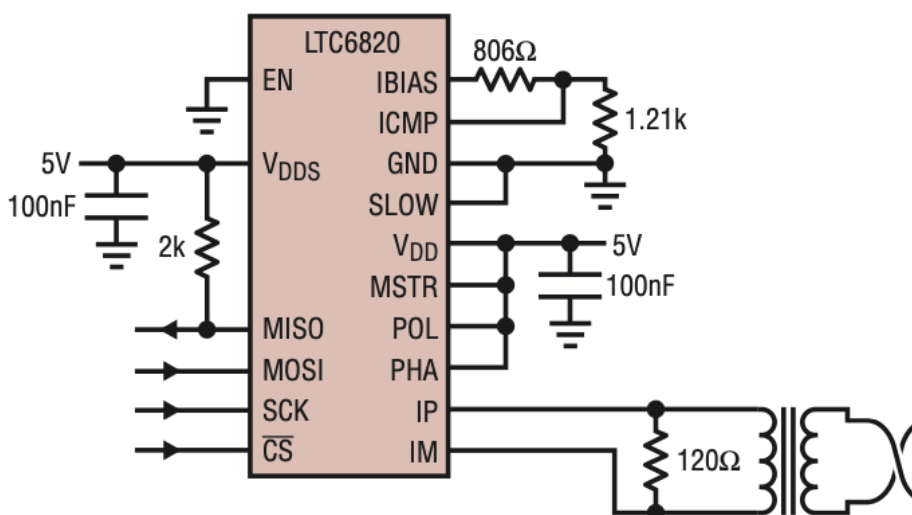


Figura 57 – Esquemático do circuito SPI. Fonte: (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, s.d.[b])

5.3.1.3 Medição da corrente

Considerando as observações do estudo realizado pela Texas Instruments, optou-se pela utilização do sensor de corrente por efeito Hall por se tratar de um método não invasivo, visto que o projeto de bateria em questão trabalha com uma alta corrente, reduzindo assim as perdas no sistema e melhorando o desempenho do mesmo. O sensor escolhido tem saída em tensão que varia de 0 a 5 V, devido a isso o circuito para tratamento do sinal ficou simples com apenas um filtro e um ganho de 0,5 V/V pois o processador trabalha com 3,3 V.

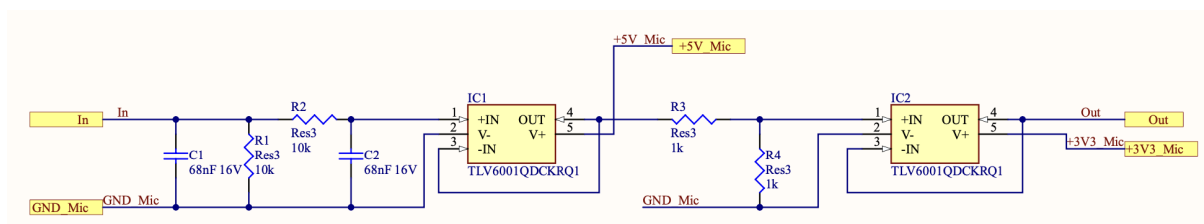


Figura 58 – Esquemático do circuito do sensor de corrente. Fonte: Autor (2021)

5.3.1.4 Medição da tensão

Para conseguir fazer o controle da pré-carga dos capacitores do inversor, é necessário saber a tensão nos capacitores do inversor e a tensão nos polos do banco de baterias. Para isso projetou-se o circuito da Figura 59, o circuito consiste em um filtro passa faixas com frequências de corte de aproximadamente 0,15 Hz e 95 Hz seguido de um amplificador diferencial isolado, ao final adicionou-se um buffer para limitar o valor de saída em 3,3 V.

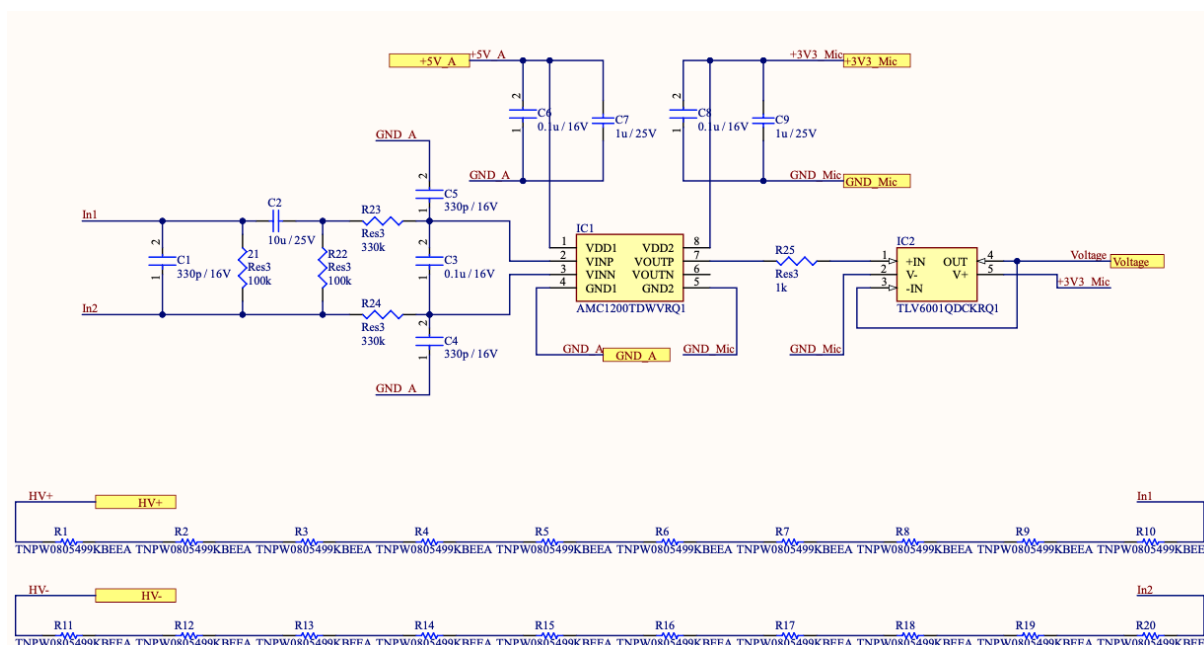


Figura 59 – Esquemático do circuito do sensor de tensão. Fonte: Autor (2021)

5.3.1.5 Saídas digitais

Para acionar os contadores de potência, adicionou-se cinco circuitos de saídas à relé, os circuitos foram dimensionados para suprir uma corrente de até 300 mA e garantir a isolamento no acionamento dos contadores da bateria. Também são utilizados para acionar o sistema de arrefecimento das baterias, tais como bomba de água e ventoinhas. A Figura 60 demonstra o circuito final.

Para a aquisição da temperatura das células, utilizou-se as entradas analógicas genéricas disponíveis no LTC6804, foram utilizados cinco termistores NTC em cada unidade de aquisição, totalizando 110 pontos de medição de temperatura no banco de baterias, cobrindo 62,5 % das células.

5.3.3 Medição das tensões e balanceamento

Para a medição da tensão utilizou-se um filtro RC com frequência de corte de 1 kHz, visto que a frequência de chaveamento do inversor utilizado é de 5 kHz, assim tem-se uma atenuação de aproximadamente -10 dB conforme a Figura 62 .

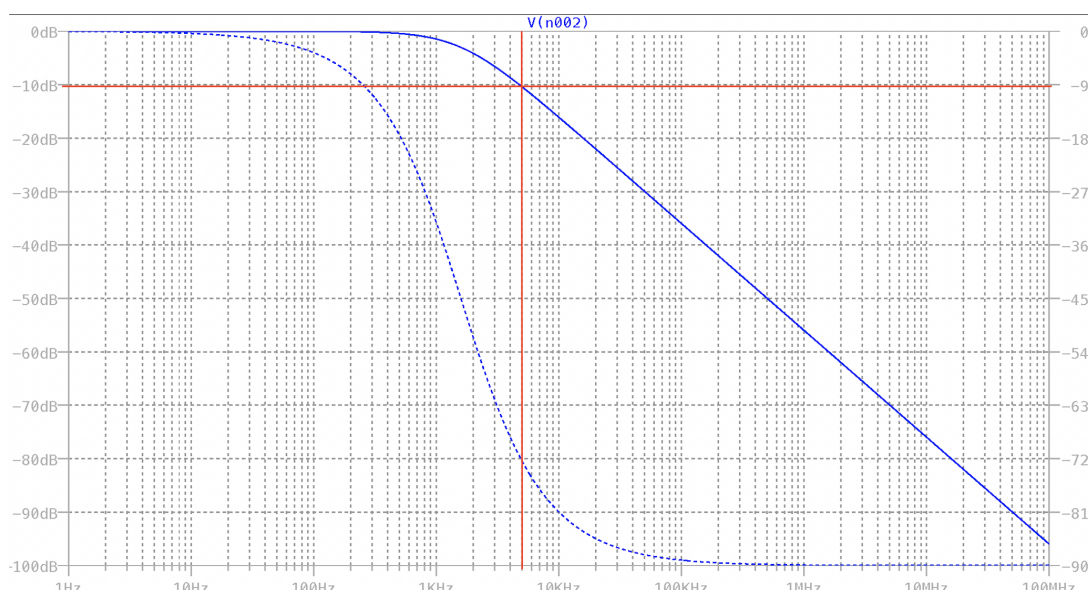


Figura 62 – Diagrama de Bode filtro passa-baixas. Fonte: Autor (2021)

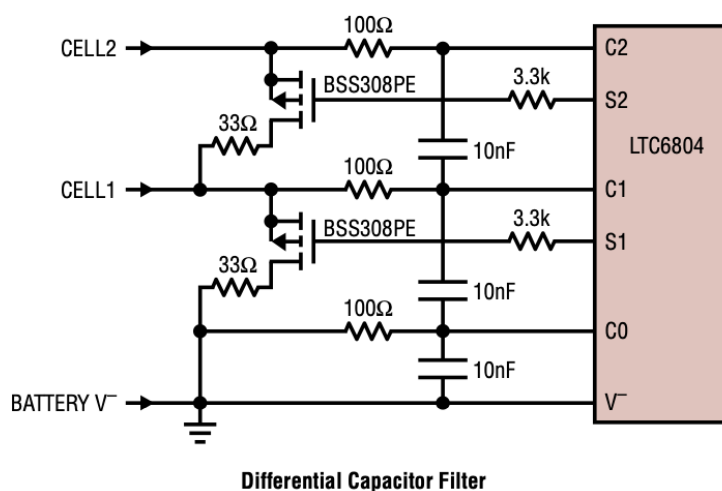


Figura 63 – Esquemático do circuito de aquisição de tensão. Fonte: (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, s.d.[a])

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os objetivos propostos no início deste estudo, tem-se que todos os objetivos foram contemplados no decorrer do projeto. Todos os componentes utilizados na placa de circuito impresso são componentes com qualificação automotiva AECQ ou compatíveis com homologação ISO 26262, o sistema possui comunicação CAN padrão automotivo SAE J1939 e todas as interfaces são isoladas galvânicamente, o que garante uma maior segurança na operação do sistema.

Com esse estudo obteve-se o que foi inicialmente proposto, o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de baterias, com o desenvolvimento de um hardware e software capaz de garantir a operação segura de um banco de baterias de íons de lítio.

Nos apêndices encontra-se o esquemático e layout de todos os circuitos desenvolvido para este estudo, juntamente com o código em linguagem C, nas figuras 64, 65, 66 e 67, encontra-se a renderização final das placas de circuito impresso desenvolvidas.

6.1 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Conforme explicitado no início desse estudo, o projeto tem possibilidade de programação para futuras implementações de algoritmos de estimativa de SoH e DoD, para que se possa ter uma previsão do funcionamento do sistema. Além desses parâmetros, outros dois muito importantes para o controle dos motores são as correntes máximas de carga e descarga (CCL - *Charge Current Limit*, DCL - *Discharge Current Limit*), esses dois limites de corrente ajudam a VCU do veículo a não estressar as baterias e causar falhas no sistema, apesar de se ter implementado uma estimativa do CCL e DCL neste projeto, foi aplicado de uma forma simples.

Para aprimorar a estimativa do estado de carga da bateria, pode-se incluir o efeito da histerese na leitura de tensão das baterias, o que não foi considerado neste estudo. Uma função também importante é a implementação de um sistema de monitoramento de isolamento (IMD - *Isulation Monitoring Device*), esse sistema monitora a isolamento galvânica entre o chassi do veículo e o circuito de alta tensão.

REFERÊNCIAS

ALTIUM. **Home Page**. Disponível em: <<https://www.altium.com>>. Acesso em: 20/04/2021.

DAOWD, Mohamed; ANTOINE, Mailier; OMAR, Noshin; LATAIRE, Philippe; VAN DEN BOSSCHE, Peter; VAN MIERLO, Joeri. Battery Management System—Balancing Modularization Based on a Single Switched Capacitor and Bi-Directional DC/DC Converter with the Auxiliary Battery. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 2897–2937, 2014. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en7052897. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/7/5/2897>>.

FARAGHER, Ramsey. Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation [Lecture Notes]. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 29, n. 5, p. 128–132, 2012. DOI: 10.1109/MSP.2012.2203621.

GENERAL ELECTRIC COMPANY. **SHHD001A3B Hammerhead* Series; DC-DC Converter Power Modules**. Disponível em: <<https://library.industrialsolutions.abb.com/publibrary/checkout/SHHD001A3B?TNR=Data%5C%20Sheets%5C%7CSHHD001A3B%5C%7Cgeneric>>. Acesso em: 18/02/2022.

HONGWEN HE, Rui Xiong; FAN, Jinxin. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. **Energies**, v. 4, n. 4, p. 582–598, 2011. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/4/4/582>>. Acesso em: 10/04/2020.

HU, Rui. **Battery Management System For Electric Vehicle Applications**. 2011. Master Thesis – University of Windsor. Disponível em: <<https://scholar.uwindsor.ca/etd/5007>>.

KVASER. **Home Page**. Disponível em: <<https://www.kvaser.com/can-protocol-tutorial/>>. Acesso em: 22/06/2021.

LACTEC. **Home Page**. Disponível em: <<https://lactec.org.br>>. Acesso em: 14/01/2022.

LEM INTERNATIONAL SA. **DHAB S/124**. Disponível em: <<https://www.lem.com/en/dhab-s124>>. Acesso em: 18/02/2022.

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **LTC6804-1/LTC6804-2 Multicell Battery Monitors**. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680412fc.pdf>>. Acesso em: 07/12/2021.

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **LTC6820 - Isolated Communications Interface**. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc6820.pdf>>. Acesso em: 07/12/2021.

MANIAR, Krunal. Comparing shunt- and hall-based isolated current-sensing solutions in HEV/EV. **Texas Instruments Incorporated**, 2018. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/an/sbaa293b/sbaa293b.pdf>>. Acesso em: 13/02/2020.

NXP SEMICONDUCTOR. **Home Page**. Disponível em: <<https://www.nxp.com/design/development-boards/automotive-development-platforms/mpc57xx-mcu-platforms/mpc5748g-development-board-for-secure-gateway:DEVKIT-MPC5748G>>. Acesso em: 15/05/2021.

PLETT, Dr. Gregory L. **Modeling, Simulation, and Identification of Battery Dynamics**. Estados Unidos da América: Notas de Aula, 2018. P. 33.

SAE INTERNATIONAL. **Home Page**. Disponível em: <<https://www.sae.org>>. Acesso em: 12/02/2021.

SAE INTERNATIONAL. **The SAE J1939 Communications Network**. Disponível em: <https://www.sae.org/standards/content/j1939/1_201105/>. Acesso em: 28/03/2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **ISO1042 Isolated CAN Transceiver**. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso1042.pdf?ts=1654201456386&ref_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.google.com%5C%252F>. Acesso em: 07/12/2021.

ZHANG, Ruifeng; XIA, Bizhong; LI, Baohua; CAO, Libo; LAI, Yongzhi; ZHENG, Weiwei; WANG, Huawen; WANG, Wei. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. **Energies**, v. 11, n. 7, 2018. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en11071820. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1820>>.

Apêndices

APÊNDICE A – PROJETO FINAL DO CIRCUITO

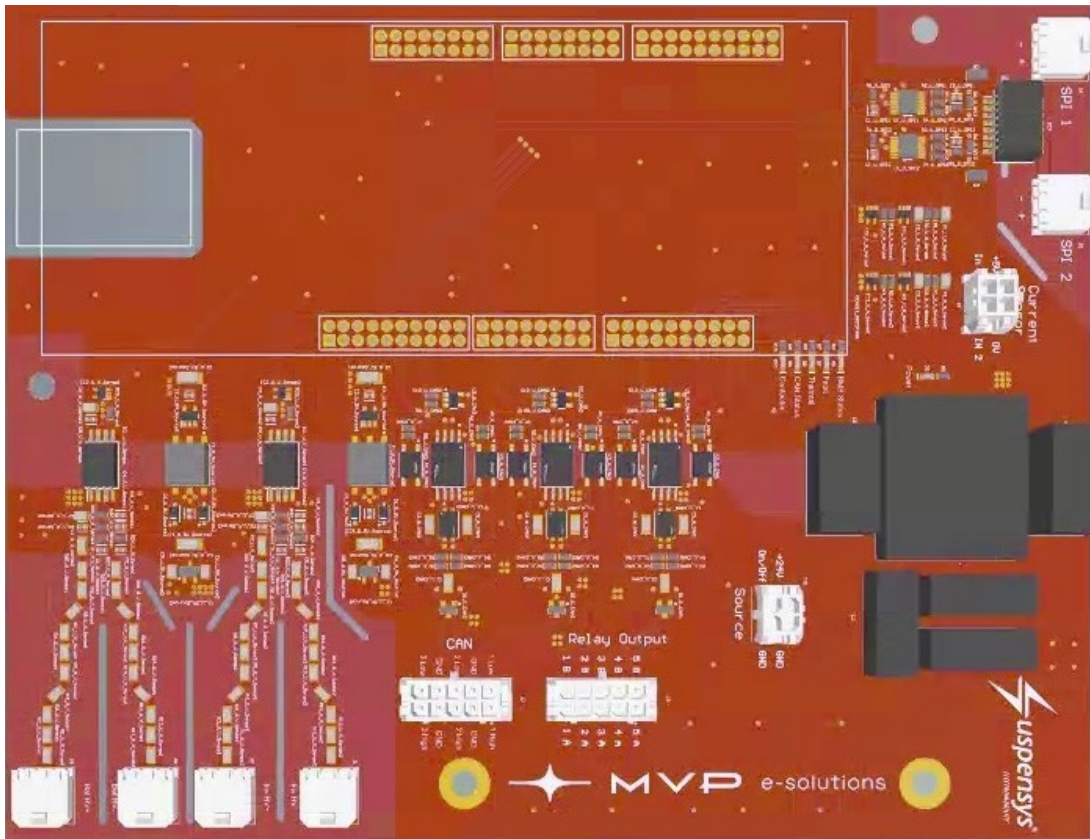


Figura 64 – Projeto final unidade de controle face superiro. Fonte: Autor (2021)

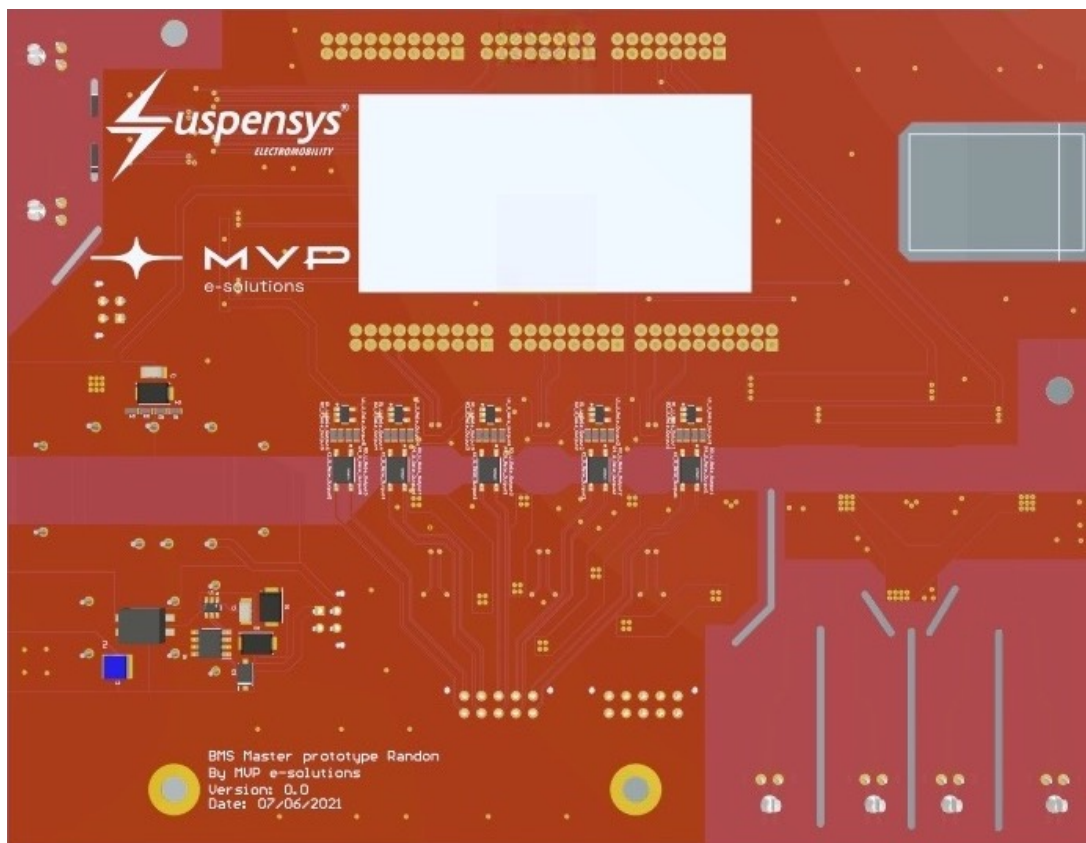


Figura 65 – Projeto final unidade de controle face inferior. Fonte: Autor (2021)

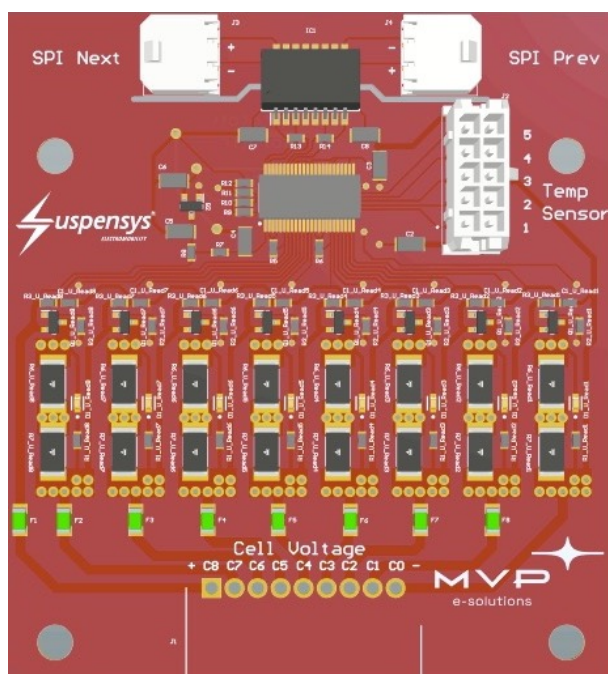


Figura 66 – Projeto final unidade de aquisição face superior. Fonte: Autor (2021)

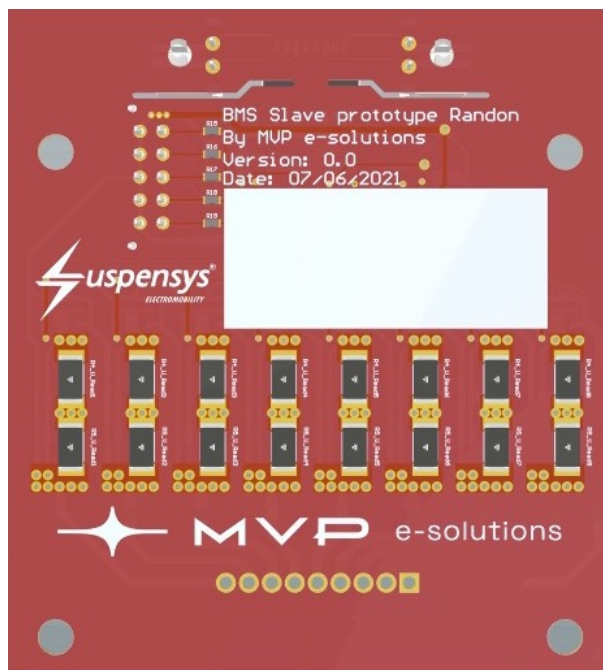


Figura 67 – Projeto final unidade de aquisição face inferior. Fonte: Autor (2021)

APÊNDICE B – CODIGO PARA A REGRESSÃO DE PARÂMETROS DA BATERIA

Código 1 – Filtro de Kalman implementado em Python

```
1     def Kalman(cap, corrente, eff, capfit, dt):
2         global bias
3         dt /= 3600
4         amp = corrente - bias
5         capfit += dt * amp * eff
6
7         P[0][0] += eff*dt*(P[1][0] + P[0][1] + eff*dt*P[1][1]) +
            Q_cap*dt
8         P[0][1] += eff*dt*P[1][1]
9         P[1][0] += eff*dt*P[1][1]
10        P[1][1] += Q_amp*dt
11
12        y = cap - capfit
13
14        S = P[0][0] + R_measure
15
16        K[0] = P[0][0] / S
17        K[1] = P[1][0] / S
18
19        capfit += K[0] * y
20        bias += K[1] * y
21
22        P[1][1] -= K[1] * P[0][1]
23        P[1][0] -= K[1] * P[0][0]
24        P[0][1] -= K[0] * P[0][1]
25        P[0][0] -= K[0] * P[0][0]
26
27        return capfit
```

APÊNDICE C – CODIGO PARA A REGRESSÃO DE PARÂMETROS DA BATERIA

Código 2 – Codigo para a regressão de parâmetros da bateria

```
1     Vc = 0
2     soc = 1
3     cap = abs(np.average(Data.T[1])*Data.T[0][-1]/3600)
4
5     # define objetivo
6     def objective(x, a, b, c): # a=r0, b=r1, c=c1
7         V = np.zeros(len(x))
8         global soc
9         soc = 1
10        Ir1 = 0
11        Ir2 = 0
12
13        for k in range(len(x)):
14            Current = Data.T[1][k]
15            #Lookup table do Soc x OCV
16            OCV = lookUp2(soc)
17            # Calculo do SoC pela integral da corrente
18            soc -= (-Current*5/3600)/cap
19            # Eq 11
20            V[k] = OCV + b*Ir1 + a*Current
21            # Eq 15
22            Ir1 = Ir1*math.exp(-5/(b*c)) + (1 -
                math.exp(-5/(b*c)))*Current
23
24        return V
25
26
27    # Escolha das variaveis de entrada e saida
28    x, y = np.arange(min(Data.T[0][:2500]), max(Data.T[0][:2500]),
29                    5), Data.T[2][:2482])
30
31    # curve_fit()
32    popt, _ = curve_fit(objective, x, y, bounds=(0, np.inf))
33
34    # Apresenta os valores encontrados
35    a, b, c = popt
36    print('R0 = %.7f, R1 = %.7f, C1 = %.7f' % (a, b, c))
```


Anexos

ANEXO A – FOLHA DE DADOS DA CÉLULA DE BATERIA UTILIZADA



EVE Energy Co., Ltd

Product Specification

File No: LF90K-73103

Version: A

Effective Date: May 01, 2019

Product	LFP Power Battery
Model	LF90K
Specification	3.2V 90Ah
Draft	Yong Zhang
Checked	Si Huang
Approved	Zhengzhong, Lv

Tel: +86 (752) 2630 809

Fax: +86 (752) 2606 033

Address: No.38, Huifeng 7road, Zhongkai Hi-Tech zone, Huizhou,
Guangdong, China



Contents

1. Scope	1
2. Description and Model	1
2.1 Description:	1
2.2 Model:	1
3. Drawing	1
4. General Technical Parameter	2
5. Test conditions	3
5.1 Standard Test Conditions	3
5.2 Measuring Equipment	3
5.3 Standard Charge	3
5.4 Quick Charge	3
5.5 Standard Discharge	3
6. Main Performance	4
6.1 Electrical performance	4
6.2 Safety performance	5
7. Transportation	6
8. Storage and other matters	6
8.1 Long-term storage	6
8.2 Other business	6
9. Handling of Cells	6
9.1 Charging	6
9.2 Discharge	7
9.3 Connection	7
9.4 Announcement	7
Appendix: battery product performance curve	8

History of specification

Date	Contents	Remarks
2019-05-01	First issue	A

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	1/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

1. Scope

This specification is applied to Rechargeable LFP Power Battery with aluminum shell (3.2V 90Ah) manufactured by EVE Energy Co., Ltd., in which the description and model, main performance, test conditions and precautions of the product are included.

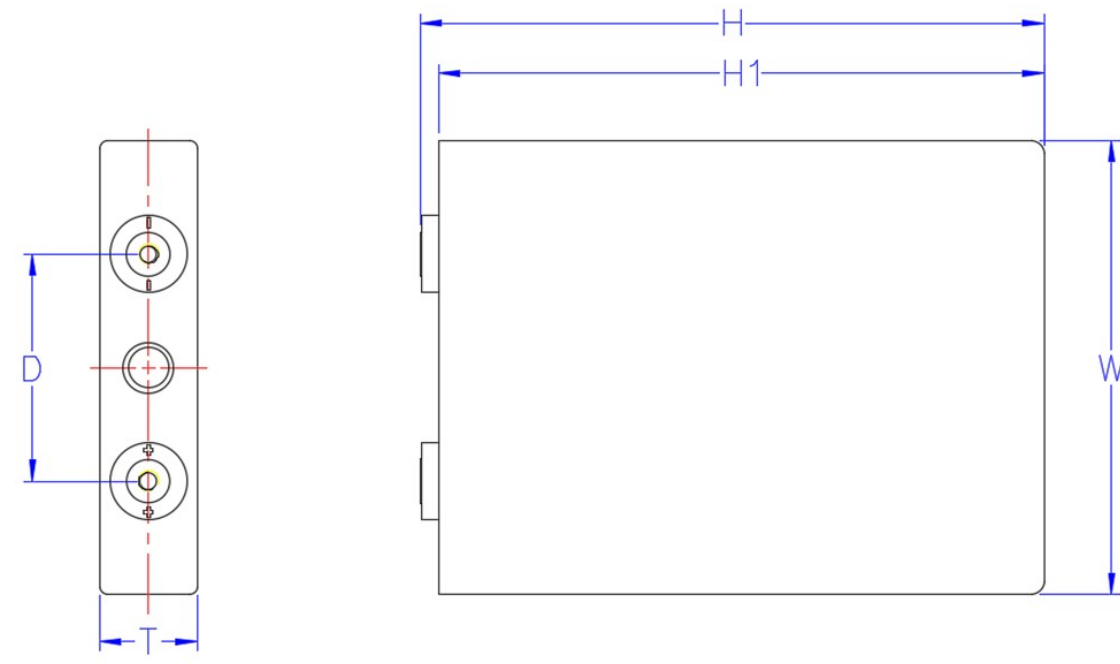
The product can be applied for Vehicle power supply, Storage system, etc.

2. Description and Model

2.1 Description: LFP Li-ion Power Battery with aluminum shell.

2.2 Model: LF90K

3. Drawing



Item	Parameter	Size
W	Width	130.3 ±0.3mm
T	Thickness(30% SOC)	36.7 ±0.5mm
H	High (total)	200.5 ±0.5mm
H1	High (subject)	195.5 ±0.5mm
D	Tabs Distance	67.0±1.0mm

Remark: The pole is a double aluminum pole structure. The internal screw with size M4 is used in the poles. **The anti-torsion of pole is 8Nm. The torsion should be less than 8Nm when used.** The effective thread hole depth is 6mm.

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	2/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

4. General Technical Parameter

#	Item		Parameter	Remark
1	Typical Capacity		91.5 Ah @ 1.0C discharge	Discharge current 1.0C with 2.5V cut off. (25±2)°C
2	Minimum Capacity		90.0 Ah @ 1.0C discharge	
3	Typical Voltage		3.2V	Under 0.5CA cc-discharge
4	AC Impedance Resistance		≤0.5mΩ	
5	Charge current (CC-CV)	Max Charge Current	3C	The maximum charge current of the battery does not exceed 3C under 0°C ~ 45°C.
		Cut-off Voltage	3.65V	
6	Discharge	Max Discharge Current	3C	Preference value.
		Cut-off Voltage	2.5V	
7	Charging time	Standard	1.0h	1.0C charge (time is reference)
		Quick-charge	0.33h	3C charge (time is reference)
8	Recommend SOC Window		SOC: 10%~90%	
9	Charging Temperature		0°C~55°C	See the appendix for details.
10	Discharging Temperature		-20°C~55°C	Battery can work at specified temperature range with capacity loss in tolerance.
11	Storage Temperature	One month	-20°C~45°C	
		One year	0°C~35°C	
12	Storage Humidity		<70%	
13	Weight		1970±100g	

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	3/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

5. Test conditions

5.1 Standard Test Conditions

Test should be conducted with new batteries within one month after shipment from our factory and the cells shall not be cycled more than five times before the test. Unless otherwise defined, test stated in this specification should be conducted at temperature of $25\pm 2^{\circ}\text{C}$, humidity 45~85% and Test should be performed under standard atmospheric conditions with 86KPa~106KPa pressure.

5.2 Measuring Equipment

All equipment and equipment (including test equipment and instruments for monitoring and monitoring test parameters) shall be tested or met according to the relevant national verification procedures or relevant standards and shall be valid for the period of validity. All test instruments, equipment should have sufficient accuracy and stability, the accuracy should be higher than the measured accuracy of an order of magnitude or error is less than one-third of the allowable error of the measured parameters.

5.3 Standard Charge

The standard charge means charging the cell with charge current 1.0CA and constant voltage 3.65V at $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$, 0.05C cutoff.

5.4 Standard Discharge

The standard discharge means discharging the cell with discharge current 1.0CA and cutoff voltage 2.5V at $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$. If required, the battery can be discharged at 1.0CA constant current to a cutoff voltage of 2.5V.

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	4/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

6. Main Performance

6.1 Electrical performance

No.	Item	Requirements	Measuring Procedure
1	Appearance	Battery should be clearly marked without any defect such as breakage, leakage and oil pollution	
2	Normal discharge performance	Discharge capacity/nominal capacity×100% A) 0.5CA ≥100% B) 1.0CA ≥100% C) 3.0CA ≥97%	After standard charge and 1h rest, discharge to 2.5V cutoff with the current of 0.5 C(A), 1.0C(A), 3.0C(A) respectively. Repeating 3 times, if the capacity is not qualified.
3	Discharge performance at different temperature	Discharge capacity/nominal capacity×100% A)55℃≥95% (Cutoff 2.5V) B)-20℃≥70% (Cutoff 2.0V)	Measure the initial capacity and state of the battery, after standard charge and 5h rest at 55℃, discharge to 2.5V cutoff with the current of 1.0C(A), after standard charge at 23±2℃ and 24h rest at -20℃±2℃, measure the termination capacity with 1.0C (A)
4	Charge Retention at RT	Capacity Retention≥95% Capacity Recovery≥97%	Measure the initial capacity and state of the battery, after standard charge and open the circuit for 28 days, discharge to 2.5V cutoff with the current of 1.0C(A), calculate the remaining capacity, the retention can be expressed as a percentage of nominal capacity. After standard charged and 30mins rest, calculate the discharging capacity (Ah), the recovery can be expressed as a percentage of nominal capacity the recovery is measured with discharge current 1.0CA with 2.5V cut-off at (25±2) °C.
5	cycle life	(1) A.≥5000 cycle B.≥6000 cycle (2) ≥6000 cycle	(1)Without fixture, after standard charged and 30mins rest, discharge to 2.5V cutoff with the current of 1.0 C (A) at (25±2) °C, and then start the next cycle: A. end with the capacity decrease to 80% of the initial capacity. The number of cycles is defined as the cycle life of the battery. B. end with the capacity decrease to 70% of the initial capacity.(2)With fixture, Other test conditions are the same as (1)A.
6	Initial Impedance	30% SOC condition, Measure the AC 1 KHz AC impedance	≤0.5mΩ

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	5/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

6.2 Safety performance

No.	Item	Requirements	Measuring Procedure
1	Over Charging	No fire、 No explosion	After standard charge and 1h rest at 25±5℃, charge the battery with the current of 1 CA current to 5V.
2	Over Discharge	No fire、 No explosion	After standard charge and 1h rest at 25±5℃, discharge the battery with 1CA to cutoff 0V.
3	Short-Circuit Test	No fire、 No explosion	After standard charge and 1h rest at 25±5℃, the battery is to be short-circuited with copper wire of a maximum resistance load 10mΩ for 10min.
4	Nail Pricking	No fire、 No explosion	After standard charge , Prick through the sample battery from the perpendicular direction of the battery plate with a nail having a diameter of 3mm ~ 8 mm. Steel nail remain in panels.
5	Extrusion Test	No fire、 No explosion	After standard charge and 1h rest at 25±5℃, test according to the following conditions: a) extrusion direction: perpendicular to the direction of the battery plate pressure. b) Extrusion degree: until the battery case is broken or the internal short circuit (battery voltage becomes 0V).
6	Drop Test	No fire、 No explosion	After standard charge and 1h rest at 25±5℃, the battery is dropped from a height of 1.5 meter twice onto concrete floor.

7. Transportation

Battery for shipping should be packed in boxes with the condition of half charged. The Violent vibration, impact extrusion, sun and rain should be prevented during shipping. The battery is suitable for cars, trains, ships, aircraft and other transportation vehicles.

8. Storage and other matters

8.1 Long-term storage

Batteries should be stored (more than 1 month) indoor with a dry and clean environment at 0℃~35℃. Avoiding contact with corrosive substances and staying away from fire and heat source. The battery should be charged and discharged every 6 months. The voltage for storage is between 3.0~3.3 V (30 ~ 50% SOC).

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	File Name	A	Page	6/11
File No.	LF90K-73103	File No.			

8.2 Other business

Any matters not mentioned in this specification, shall be negotiated by both parties.

9. Handling of Cells

9.1 Charging

9.1.1 Charging current

Charging current shall not exceed the maximum charging current in this specification. Otherwise it would cause the problem in charge and discharge performance, mechanical performance and safety performance, and may cause heat or leakage.

9.1.2 Charging voltage

Charging voltage shall not exceed the maximum charging current in this specification. Otherwise it would cause the problem in charge and discharge performance, mechanical performance and safety performance, and may cause heat or leakage.

9.1.3 Charging temperature

Batteries must be charged within the ambient temperature range of 0 °C~55 °C .

9.1.4 Forbidding reverse charge

Battery should be connected correctly. It is strictly prohibited to reverse charge. Otherwise it will cause the battery scrap and produce safe hidden trouble.

9.2 Discharge

9.2.1 Discharging current

Discharge current shall not exceed the maximum charging current in this specification; Otherwise it would cause dramatically capacity loss and overheating.

9.2.2 Discharge temperature

Batteries must be discharge within the ambient temperature range of -20 °C~55 °C.

9.2.3 Forbidding over-discharge

Battery management system should be installed to prevent over discharge during the usage. Over discharge will cause the battery scrap and produce safety hazard. It is necessary to state that for the battery not used for a long time, it may over discharge due to the self-discharge characteristics. To prevent the occurrence of over discharge, the battery should be regularly charge and the voltage should be remained above 2.9 V.

9.3 Battery Handling Precautions

9.3.1 Before using the battery, please read the specification and pay attention to the battery surface logo.

9.3.2 Please use the battery in a normal indoor environment, temperature: -20 °C~55 °C, relative humidity: 15 ~ 90%, atmospheric pressure: 86~106 k Pa.

9.3.3 During the usage, should be away from heat, fire, to avoid children playing with the battery, do not beat, fall or impact the battery.

9.3.4 The battery can only use the matching charger to charge.

9.3.5 Do not short circuit the battery at any time, otherwise it can cause serious damage to the battery and cause danger.

9.3.6 For the battery not used for a long time, please save the battery in the appropriate way, so that it is in a state of semi-charged, neither full nor finished.

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	File Name	A	Page	7/11
File No.	LF90K-73103	File No.			

9.3.7 The waste battery should be dealt with in a safe and secure way, do not throw it into fire or water.

9.3.8 Battery box design considerations

a) The battery box should have sufficient mechanical strength to prevent the internal battery from mechanical impact.

b) There should be no sharp corners in the location for placing the battery inside the box.

c) The measurements for increasing air convection, waterproof and dustproof and others are needed.

9.3.9 Connection

a) Polishing the pole with abrasive paper before use, otherwise it would cause bad contact or failure.

b) Using the specific tools, such as spanner, to connect the battery.

10. Announcement

Failure to observe the following precautions may result in battery leakage, overheating, explosion and/ or fire.

Warning!

1. Do not immerse the battery in water or allow it to get wet.
2. Do not strike, throw or subject the battery near a fire or in extremely hot conditions.
3. Charge with specified charge according to charging requirement
4. Do not reverse the positive (+) and negative (-) terminals.
5. Do not put the battery into a fire or apply direct heat to it.
6. Do not short-circuit the battery by connecting wires or other metal objects to the positive (+) and negative (-) terminals.
7. Do not ship or store the battery metal objects, such as necklaces, hairpins, etc.
8. Do not knock, throw, tread, bend, etc.
10. Do not directly solder the battery terminals or pierce the battery casing with a nail or other sharp object.

Caution!

a) Do not use or store the battery where is exposed to extremely hot, such as under window of a car in direct sunlight in a hot day. Otherwise, the battery may be overheated. This can also reduce battery performance and/or shorten service life.

b) Do not use battery in the strong electrostatic and magnetic field, otherwise probably the battery safety protection device and cause insecurity;

c) If the battery leaks and electrolyte gets your eyes, rinse the eyes with clean running water and get medical treatment immediately. Otherwise it will hurt the eyes.

d) Do not use the battery if it gives off an odor, generates heat, changes color or have any problems during usage, storage and discharging.

File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	8/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

Appendix: battery product performance curve

Fig.1 Rate Discharge curve at RT

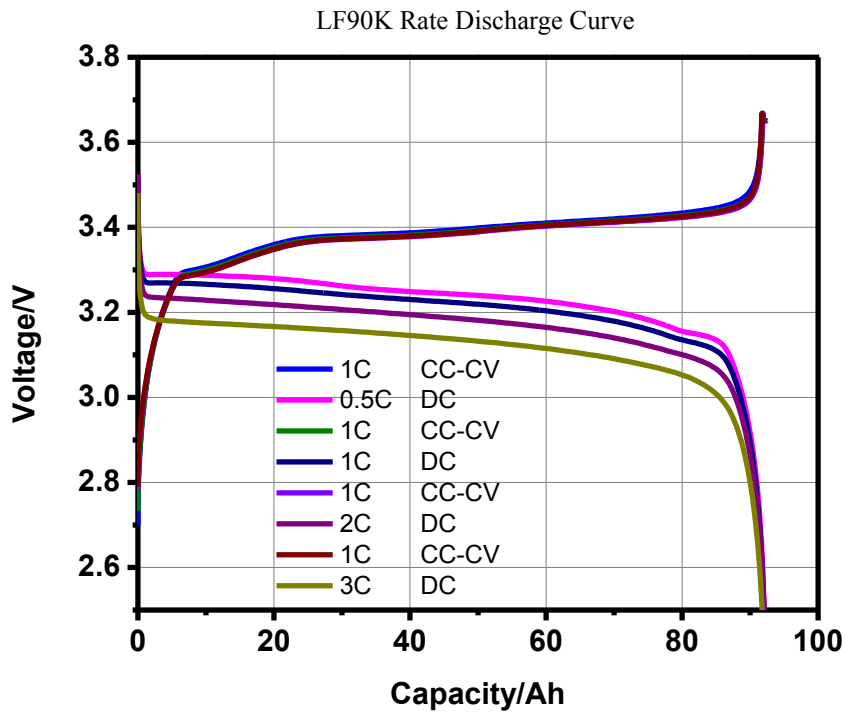
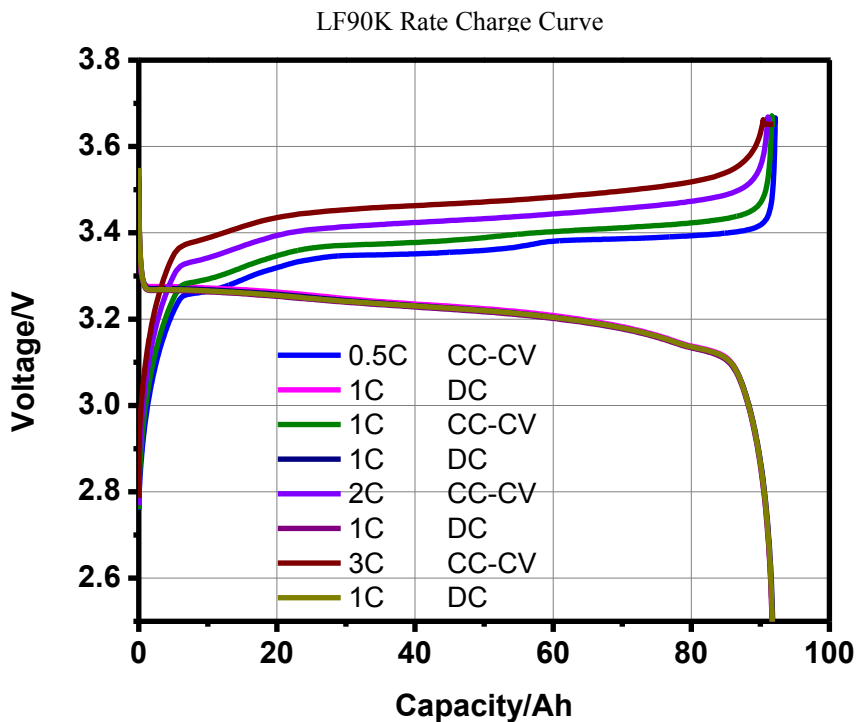


Fig.2 Rate Charge curve at RT



File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	9/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

Fig.3 Different temperature discharge curve

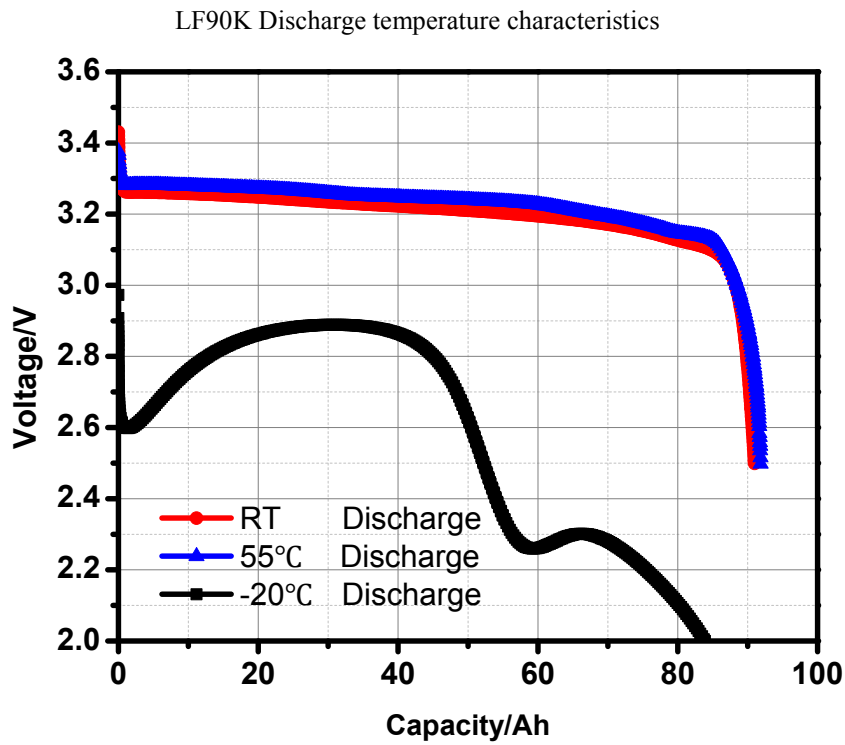
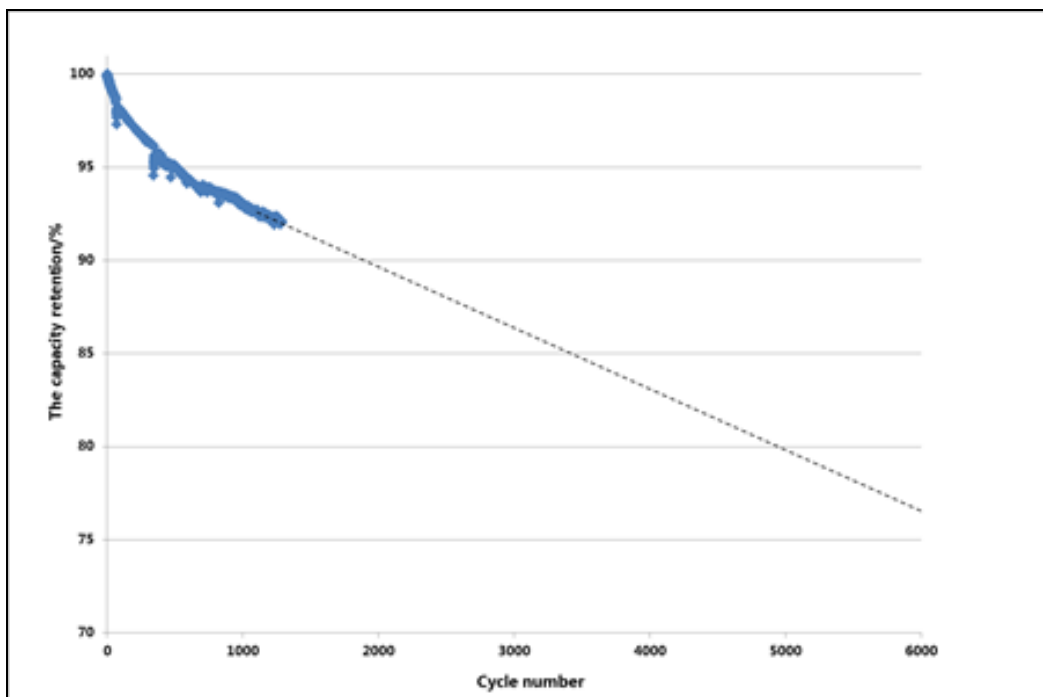


Fig.4 Cycle performance (1.0 C) curve

LF90K Cycle performance 1C/1C, RT, 3.65-2.5V



File Name	LF90K (3.2V 90Ah) Product Specification	Version	A	Page	11/11
File No.	LF90K-73103	Controlled No.			

Table 3 The permissible transient (30S) maximum charge current (Ic) of the cell at different temperature and SOC conditions

SOC(%) Temperature	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
55°C	0	9	9	9	9	18	18	18	18	18	18
50°C	0	18	18	18	18	45	45	45	45	45	45
45°C	0	45	45	45	45	90	90	90	90	90	90
25°C	0	45	90	270	270	270	270	270	270	270	270
10°C	0	9	18	45	90	90	90	90	90	90	90
0°C	0	0	18	18	18	18	54	54	54	54	54

Table 4 The permissible transient (30S) maximum discharge current (Id) of the cell at different temperature and SOC conditions

SOC(%) Temperature	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
55°C	450	450	450	360	360	270	270	180	180	90	0
25°C	450	450	450	450	450	360	270	270	180	135	0
10°C	450	450	270	270	270	180	90	90	45	45	0
0°C	180	180	180	105	180	90	45	45	45	18	0
-10°C	90	90	90	90	90	45	18	18	18	0	0
-20°C	54	54	54	54	27	27	9	9	9	0	0