

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RHUAN POFFO MOSER

IMPLEMENTAÇÃO DE BANCO DE BATERIAS COM 12V E 30Ah
USANDO CÉLULAS RECICLADAS DE LITIO-ÍON
SUPERVISIONADAS POR BMS COMERCIAL

JOINVILLE – SC

2021/2

**IMPLEMENTAÇÃO DE BANCO DE BATERIAS COM 12V E 30Ah
USANDO CÉLULAS RECICLADAS DE LITIO-ÍON
SUPERVISIONADAS POR BMS COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Bacharelado de
Engenharia Elétrica do Centro de
Ciências Tecnológicas da
Universidade do Estado de Santa
Catarina para obtenção do Grau de
Engenheiro Eletricista

Orientador: Prof. Dr. Joselito
Anastácio Heerd

JOINVILLE, SC

2021/2

RESUMO

Este trabalho é destinado a montagem de um banco de baterias de Lítio, equivalente a 12V e 30Ah, fazendo uso de 60 células de Lítio 18650 reutilizadas, com um BMS 4S 100A comercial. Obtendo assim um pack de Lítio 4S15P que será submetido a ensaios de carga e descarga. Por fim, são apresentadas as conclusões.

Para uma melhor síntese do assunto, serão apresentadas informações sobre baterias, principalmente de Lítio-íon, o principal item que comporá o protótipo que será desenvolvido, como métodos de carga de baterias de Lítio, seus riscos e comparativos. Também será apresentado sobre a história das baterias, os tipos e características das baterias mais utilizadas atualmente, bancos de baterias e sistemas de gerenciamento de baterias (*Battery Management Systems - BMS*).

Palavras-chave: Baterias, Lítio-íon, sustentabilidade, banco, balanceamento, BMS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – VELLEV (Veículo Elétrico Leve) UDESC	6
Figura 2 - Esquema ilustrativo de uma célula eletroquímica	8
Figura 3 - Comparação de energia específica entre baterias primárias e secundárias.....	9
Figura 4 - Perfil de descarga de uma célula de Chumbo-Ácido, para taxas de descarga diferentes.....	11
Figura 5 - Ilustração do banco de baterias de Níquel Hidreto Metálico utilizado no EV1 da General Motors	12
Figura 6 - EV1 da General Motors	12
Figura 7 - Perfil de descarga de uma célula de Níquel Hidreto Metálico, para taxas de descarga diferentes	13
Figura 8 - Perfil de descarga de uma célula de Lítio de 3000mAh aproximadamente, para taxas de descarga diferente.....	15
Figura 9 – Ilustração das formas construtivas cilíndrica e prismática de uma célula de bateria de Lítio-Íon.....	16
Figura 10 – Células de Lítio cilíndricas, diversas, recicladas 18650.....	17
Figura 11 – Forma comercial de baterias de Lítio Polímero atualmente.....	18
Figura 12 - Perfil de descarga de uma célula de Lítio Polímero, para taxas de descarga diferentes.....	19
Figura 13 - Curva de descarga de célula de Lítio NCR185650PF para diferentes temperaturas	21
Figura 14 - Curva característica do Método CC-CV de recarga de baterias de Lítio para uma célula da Panasonic.....	23
Figura 15 - Bancos de baterias Lítio, composto por sete associações em série e cinco em paralelo, 7S5P	24
Figura 16 - Células de Lítio de 3,7V associadas em série, 3S	25
Figura 17 - Células de Lítio de 3,7V associadas em paralelo, 1S3P	25
Figura 18 - Associação de três células de Lítio de 3,7V: (a) em série, (b) e (c) com duas células em paralelo, 3S2P	26
Figura 19 - Estrutura distribuída de um BMS genérico com N baterias	28
Figura 20 - Estrutura centralizada de um BMS genérico com N baterias	28
Figura 21 - Exemplo de um banco de baterias de 12.3V, com células em equilíbrio (a) e desequilíbrio (b)	30
Figura 22 - Células desbalanceadas em um banco de baterias em processo de descarga e carga, respectivamente.....	30
Figura 23 - Método shunt resistivo controlado	31
Figura 24 - Estado de Carga de uma célula de Lítio-íon genérica de 3,7V.....	32
Figura 25 - Bateria de notebook da marca Asus, modelo A32-M50 de 11,1V e 4800mAh, com o encapsulamento lacrado	34
Figura 26 - Bateria de notebook da marca Asus com o encapsulamento parcialmente aberto	34
Figura 27 - Bateria de notebook da marca Asus com o encapsulamento aberto, demonstrando a presença de 6 células de Lítio, de forma 3S2P	35
Figura 28 - Carregador e analisador LiitoKala Lii- 500, conectado com 4 células de Lítio-Íon	35
Figura 29 - Processo do FAST TEST no carregador e analisador Lii-500.....	36

Figura 30 - Processo do NOR TEST no carregador e analisador Lii-500	36
Figura 31 - Células de Lítio-Íon recicladas, após serem testadas e classificadas	37
Figura 32 - Informativo do equipamento Lii-500, relatando o fim do NOR TEST com Capacidade igual a 0 mAh	38
Figura 33 – Site POWER Calculation utilizado para calcular o pack previsto neste projeto, formado pela associação 4S15P	39
Figura 34 - Site rePackr mostrando uma sugestão de ordenação das células	40
Figura 35 - Distribuição de células de Lítio demarcadas para a construção do banco	41
Figura 36 - Rolo de fita de Níquel com 8mm de largura e 0.1mm de espessura	42
Figura 37 - Proposta de Ligação com fitas de níquel do lado inferior do banco de baterias 4S15P	42
Figura 38 - Proposta ligação com fitas de níquel do lado superior do banco de baterias 4S15P	42
Figura 39 - Equipamento Suniko 788H, solda ponto para células cilíndricas de Lítio	43
Figura 40 - Vista superior do banco 4S15P, soldado com fitas de Níquel pela solda ponto Suniko 788H	43
Figura 41 - Vista inferior do banco 4S15P, soldado com fitas de Níquel pela solda ponto Suniko 788H	44
Figura 42 - BMS 4S 14.8V 100A com balanceamento que será utilizado na construção de um banco de baterias de 12V e 30Ah	44
Figura 43 – Interface para programar parâmetros BMS, via bqStudio®	46
Figura 44 - Banco de baterias montado com o BMS 4S 100A instalado	47
Figura 45 - Banco de Lítio posicionado para a realização dos testes, configurado para a carga	48
Figura 46 - Método CC-CV de carga com 0.17C de corrente	49
Figura 47 - Tensão das células em série após carga com 0,17C	50
Figura 48 - Método CC-CV de carga com 0.33C de corrente	51
Figura 49 - Tensão das células em série após carga com 0,33C	52
Figura 50 - Método CC-CV de carga com 0.5C de corrente	53
Figura 51 - Tensão das células em série após carga com 0,5C	53
Figura 52 - Sinalização do BMS para sobretensão, via led vermelho	54
Figura 53 – Imagem térmica do banco de baterias, focando nas células 35 e 36 com sobreaquecimento em relação as demais, em teste de carga com 0.5C	55
Figura 54 - Gráfico de tensão por corrente da descarga de aproximadamente 1C da bateria	56
Figura 55 - Tensão das células em série do banco após o teste de descarga com 1C	57
Figura 56 - Gráfico de descarga, tensão por corrente em função do tempo, do banco com taxa de 20A	58
Figura 57 - Tensão das células em série do banco após o teste de descarga com taxa de 20A	59
Figura 58 - Bateria de Lítio comercial 12V e 2,4Ah, marca Skyrich	61
Figura 59 - Teste de carga com bateria de Lítio comercial com taxa de 0,5C	61
Figura 60 - Teste de descarga com bateria de Lítio comercial com taxa de 0,5C aproximadamente	62
Figura 61 - Atuação da proteção de subtensão do BMS da bateria comercial LIX7L da marca Skyrich, quando descarregada com taxa de 0,5C	63
Figura 62 – Teste de descarga com bateria de Lítio comercial com taxa de 1C aproximadamente	64

Figura 63 - Atuação BMS da bateria comercial, modelo LIX7L da marca Skyrich, 1C.....64

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	5
1.1	OBJETIVO GERAL	6
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	BATERIAS.....	7
2.1.1	Estrutura e classificação das baterias.....	7
2.1.2	Baterias de Chumbo-Ácidas	10
2.1.3	Baterias de Níquel Hidreto Metálico.....	12
2.1.4	Baterias de Lítio-Íon	14
2.1.4.1	Precauções e cuidados ao utilizar com baterias de Lítio-Íon	20
2.1.4.2	Temperatura e seus efeitos nas células de Lítio-Íon.....	21
2.1.4.3	Métodos de carga e descarga de baterias de Lítio-Íon.....	22
2.2	BANCO DE BATERIAS DE LÍTIO-ÍON.....	24
2.2.1	Associações série de células	24
2.2.2	Associações paralelas de células	25
2.2.3	Múltiplas associações em série e associações paralelas.....	26
2.3	SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE BATERIA	27
2.3.1	Estrutura de um sistema de gerenciamento de bateria	27
2.3.2	Funções dos sistemas de gerenciamento de bateria	29
2.3.2.1	Técnicas de balanceamento.....	29
2.3.2.2	Estimação do estado de carga	32
2.3.2.3	Estimação do estado de vida	33
2.3.2.4	Dispositivos de monitoramento.....	33
3	DESENVOLVIMENTO E TESTES DE PACK DE BATERIAS DE LÍTIO	34
3.1	OBTENÇÃO DAS CÉLULAS DE LÍTIO-ÍON.....	34
3.2	AVALIAÇÃO DAS CÉLULAS DE LÍTIO-ÍON.....	35
3.3	PROJETO	38
3.4	ESCOLHA DO BMS	44
3.5	TESTES	47
3.5.1	Teste de carga	49
3.5.2	Teste de descarga	56
3.5.3	Teste de carga em uma bateria comercial	60
3.5.4	Teste de descarga em uma bateria comercial	62

4 CONCLUSÕES GERAIS	66
4.1 TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
APÊNDICE A – LISTA DE BATERIAS TESTADAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

O consumo desenfreado é uma característica latente nas últimas décadas, assim não poderia deixar de ser, ainda mais quando o assunto são artigos tecnológicos, que com os constantes aprimoramentos tornam-se “obsoletos” rapidamente. Por tanto, a reciclagem dos artigos tecnológicos torna-se de suma importância, assim como a necessidade constata de aprimoramento em seus sistemas de gestão, que estão diretamente ligados à sua vida útil.

No caso das baterias de Lítio-íon, analisando apenas a aplicação em computadores, que serão o foco de obtenção de material para esse trabalho, em sua maioria são compostas de 4 a 8 células de Lítio-íon. Ao serem descartadas todas as células são perdidas, quando na verdade apenas uma pode estar avariada, gerando um alto desperdício de material.

Pensando nisso e outros fatores relacionados a sustentabilidade, mobilidade elétrica e gerenciamento de baterias que este trabalho está sendo desenvolvido. Desta forma, é proposto a montagem e estudo de um *pack* de Lítio-íon 4S15P utilizando apenas células recicladas que foram obtidas via produtos em descarte tecnológico, fazendo uso de um sistema de gerenciamento de bateria (BMS) comercial, com a intenção de ser utilizado posteriormente em um veículo elétrico leve que no momento faz uso de baterias de chumbo-ácido.

Grande parte da motivação deste trabalho vem do desejo de substituir o conjunto de baterias chumbo-ácidas do kart elétrico do projeto VELLEVE (Veículo Elétrico Leve), Figura 1, da Universidade do Estado de Santa Catarina, por baterias de Lítio, que possuem maior densidade energética, o que faz com que o banco de baterias para a mesma capacidade seja menor e mais leve, o que é muito bom para a performance e eficiência do veículo, possuem ciclos de descarga mais profundos, possibilitando assim a substituição das quatro baterias de 60Ah de chumbo pelos quatro bancos de 30Ah de Lítio. A capacidade estipulada é de 30Ah por se tratarem de células recicladas, o que equivale à 45Ah se fossem utilizadas células de Lítio, de 3000mAh, novas na mesma configuração.

Figura 1 – VELLEEV (Veículo Elétrico Leve) UDESC



Fonte: Próprio Autor

1.1 OBJETIVO GERAL

A ideia principal deste trabalho é construir um banco de baterias de Lítio de 12V e 30Ah, que consiga substituir as baterias chumbo-ácidas instaladas hoje no kart do grupo VELLEEV, de forma que o veículo se torne mais leve e com melhor desempenho.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reduzir substancialmente o peso do kart;
- Construir uma bateria de Lítio-íon de baixo custo;
- Entender o funcionamento dos sistemas de baterias comerciais;
- Substituir as baterias comerciais de Chumbo-Ácido, por baterias de Lítio recicladas;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BATERIAS

Baterias são dispositivos constituídos de células eletroquímicas, uma ou mais células, que podem ser agrupadas de forma série e/ou paralelo. As células armazenam energia elétrica em forma de energia química. Existem as baterias primárias que possuem apenas um ciclo, logo depois de descarregadas precisam ser descartadas, e as secundárias, que permitem vários ciclos, podendo serem recarregadas (BERGVELD, 2001). Neste trabalho, serão utilizadas apenas baterias secundárias.

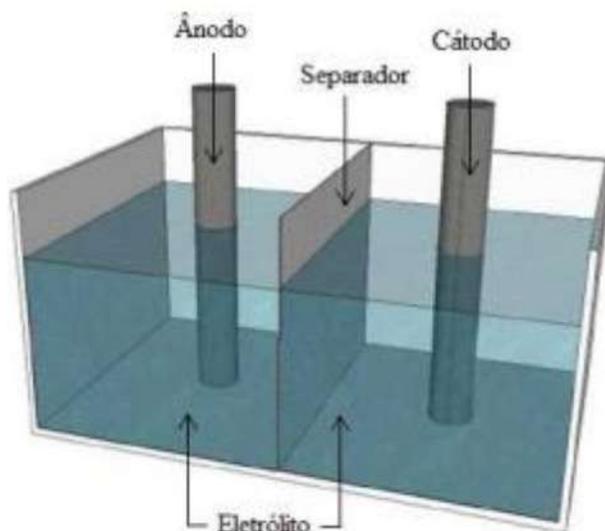
2.1.1 Estrutura e classificação das baterias

Normalmente uma célula eletroquímica é composta de quatro componentes estruturais, que são:

- **Ânodo:** também conhecido como eletrodo negativo é responsável pelo fornecimento de elétrons ao circuito externo durante a fase de descarga e é o elemento oxidado na reação eletroquímica;
- **Cátodo:** também conhecido como eletrodo positivo é responsável pela aceitação de elétrons do circuito externo durante a fase de descarga, sofrendo redução na reação eletroquímica;
- **Eletrólito:** é o meio que ocorrem as trocas de carga, dentro da célula, entre o cátodo e o ânodo. Para isso, o eletrólito deve possuir alta condutividade para os íons, porém para os elétrons a condutividade deve ser baixa, isso é feito para tentar evitar ou diminuir o efeito de auto-descarga das baterias;
- **Separador:** responsável por exercer um isolamento físico entre os eletrodos, de forma que estes fiquem separados entre si, formado de um material não condutor de elétrons, mas que permita a passagem de íons entre os eletrodos, prevenindo curtos-circuitos na bateria.

De forma ilustrativa, cada elemento anteriormente mencionado, pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema ilustrativo de uma célula eletroquímica

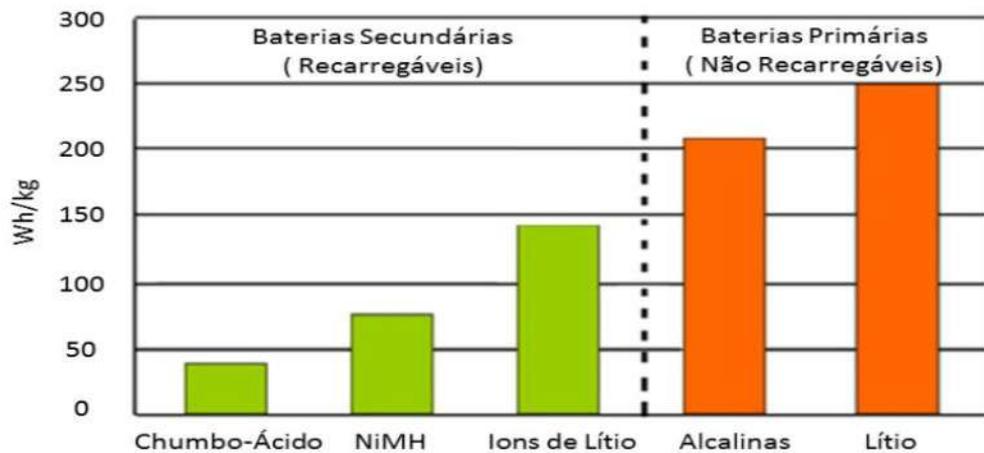


Fonte: (Duarte, 2013)

Os materiais escolhidos para a constituição do ânodo e do cátodo, condicionam algumas das características das baterias, sendo estas, tensão, capacidade de energia e outras (LINDEN e REDDY, 2001).

Como citado anteriormente, baterias são classificadas como primárias e secundárias. Nas secundárias, a energia química armazenada pode ser transformada em energia elétrica pelas reações eletroquímicas, realizando também o processo contrário. A energia química será reposta, pelo fornecimento de corrente elétrica no sentido oposto ao da descarga, assim, retornando à condição de carga original (ROOT, 2010). A Figura 3 apresenta uma comparação da energia específica entre as principais baterias primárias e secundárias.

Figura 3 - Comparação de energia específica entre baterias primárias e secundárias



Fonte: Adaptado de (Buchmann, 2011)

Para uma melhor compreensão dos tipos de baterias, são apresentados a seguir, alguns conceitos relacionados as baterias (BERGVELD, 2001).

- Densidade de Energia (Wh/l): é definida pela relação entre a quantidade máxima de energia armazenada na bateria e seu volume;
- Densidade de Potência (W/l): é definida pela relação entre a potência máxima fornecida pela bateria e seu volume;
- Capacidade de Energia (Ah): é a definição de quantidade de corrente elétrica a bateria é capaz de fornecer por hora;
- Energia Específica (W/kg): é definida pela relação entre a máxima quantidade de energia armazenada na bateria pela sua massa;
- Potência Específica (W/kg): é definida pela relação entre máxima potência de uma bateria pela sua massa;
- Taxa-C (C-rate): é definida, pela relação entre a corrente de carga ou descarga em ampéres (A) da bateria, pela sua capacidade em Ah. A título de exemplo, se uma bateria tem capacidade de 30 Ah, esta poderá fornecer

uma corrente de 30A no período de uma hora, logo, seu C-Rate seria a 1C de corrente fornecida;

- Ciclos de vida: é a quantidade de ciclos que uma determinada bateria pode ser descarregada e recarregada, sob condições especificadas pelo fornecedor;
- Tensão de Corte (*Cut-off Voltage*): é a tensão mínima que a bateria pode ser descarregada sem sofrer avaria;
- Taxa de Auto-descarga: é a definição de perda de capacidade da bateria, normalmente dada em porcentagem por mês;

2.1.2 Baterias de Chumbo-Ácidas

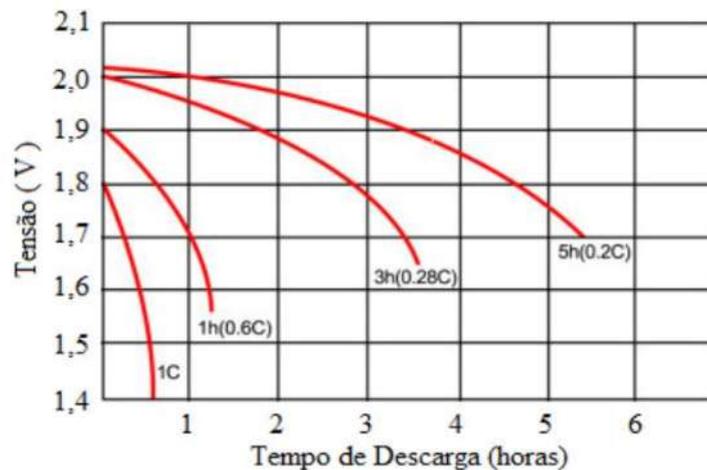
A respeito das características elétricas da bateria Chumbo-Ácida, é uma das mais conhecidas e mais antigas tecnologias de armazenamento de energia, ainda muito utilizada no meio automobilístico. Foi desenvolvida no ano de 1859 por Ganston Planté, sendo a primeira bateria a estar disponível no mercado, utilizadas como fonte de energia para os primeiros veículos que faziam uso de tração elétrica em 1895 (ROOT, 2010).

Este tipo de bateria tem o dióxido de chumbo como material para o eletrodo positivo e chumbo metálico para o eletrodo negativo, sob uma estrutura porosa, para maximizar a sua área de superfície. O material obtido a partir da descarga é o mesmo nos dois eletrodos, o sulfato de chumbo.

Durante o processo de descarga da bateria, a tensão diminui em decorrência do esgotamento de material ou perdas devido a polarização e resistência interna (ROOT, 2010). Caso a corrente de descarga seja constante, a tensão diminui até a atingir a tensão de corte, como apresentado na Figura 4.

Quanto das características elétricas da bateria de chumbo-ácido, estas apresentam em tensão média nominal de 2V por célula e uma elevada densidade de potência. Mas possuem baixa quantidade de energia específica e potência específica, devido aos seus materiais de fabricação. São de baterias relativamente fáceis de produzir, com baixo custo de produção e diversas aplicações.

Figura 4 - Perfil de descarga de uma célula Chumbo-Ácido, para taxas de descarga diferentes



Fonte: Adaptado de (Buchmann, 2011)

De um aspecto geral, baterias Chumbo-Ácidas possuem três aplicações com características distintas entre elas, sendo a primeira aplicação em automóveis, nesta, as baterias devem possuir uma elevada densidade de potência para poder fornecer elevadas corrente, mas não precisa de grande densidade de energia. Outra grande aplicação é para sistemas de tração, como em empilhadeiras, carrinhos de golf, cadeiras de rodas elétrica, bicicletas elétricas e outros.

Estas baterias necessitam de uma grande densidade de energia e de potência e serem capazes de profundos ciclos de descarga. Por fim, temos os sistemas estacionários, como *Nobreaks*, luzes de emergência, sistemas fotovoltaicos, alarmes e outros, bateria para estas aplicações deve conseguir manter-se carregada por longos períodos de inatividade e possuir alta densidade de energia (ROOT, 2010). Na Tabela 1 pode-se observar as características de uma célula de Chumbo-Ácido.

Tabela 1 – Características de uma célula genérica de Chumbo-Ácido

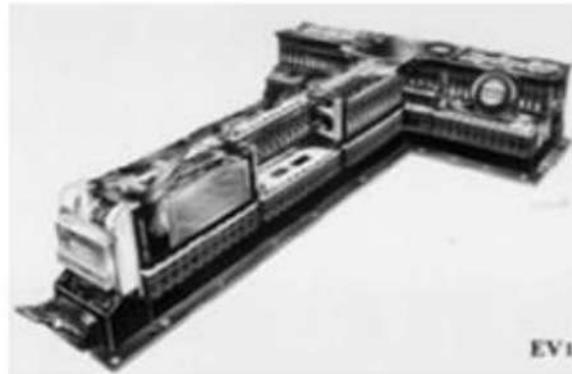
Especificações	Bateria de Chumbo-Ácido
Energia Especifica (Wh/kg)	30 - 50
Ciclos de Vida (a 80% de descarga)	200 - 300
Tempo de Carga Rápida (h)	8 - 16
Taxa de Auto-Descarga (por mês)	5%
Tolerância a Sobrecarga	Alta
Tensão Nominal (por célula)	2 V
Segurança de Utilização	Elevada – é tolerante a sobrecargas

Fonte: Adaptado de (BUCHMANN, 2011)

2.1.3 Baterias de Níquel Hidreto Metálico

As baterias de Níquel Hidreto Metálico (Nickel Metal Hydride - NiMH), começaram a ser desenvolvida em 1967, mas só se tornaram viáveis posterior à 1980, com o advento de novas ligas metálicas, que fizeram elas se tornarem baterias estáveis (BUCHMANN, 2011). A bateria de Níquel Hidreto Metálico veio como uma melhoria das baterias de Níquel Cádmio (*Nickel Cadmium* – NiCd) e tornou-se uma opção viável para EVs (*Electric Vehicle*) e híbridos. Este tipo de bateria foi utilizado no EV1 da *General Motors*, Figura 5 e Figura 6, que depois foi adotado pela *Toyota* em alguns modelos híbridos (LINDEN e REDDY, 2001).

Figura 5 - Ilustração do banco de baterias de Níquel Hidreto Metálico utilizado no EV1 da General Motors



Fonte: Adaptado de (Linden e Reddy, 2001)

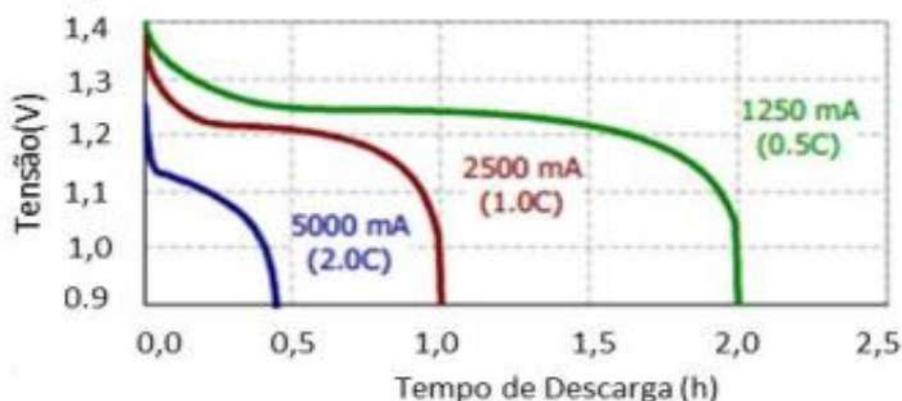
Figura 6 - EV1 da General Motors



Fonte: Auto Esporte, 2019

Baterias de Níquel Hidreto Metálico tem uma tensão nominal menor que as de Chumbo-Ácido, aproximadamente 1,25V por célula. Isso é devido a um perfil de descarga mais plano, como apresentado na Figura 7, o que faz com que seja mais difícil a determinação do estado de carga, mas possuem maior densidade de energia, tornando-as ótimas para aplicações portáteis (DUARTE, 2013).

Figura 7 - Perfil de descarga de uma célula de Níquel Hidreto Metálico, para taxas de descarga diferentes



Fonte: NH50-2500 datasheet

Se comparado a sua antecessora de Níquel Cádmio, as baterias de Níquel Hidreto Metálico apresentam como grande vantagem o não uso de Cádmio, material altamente poluente, além disso, possuem maior densidade de energia e não sofrem efeito memória¹. Como desvantagem, apresentam uma menor densidade de potência e uma baixa tolerância a sobrecargas se comparado a suas antecessoras. Se comparada as baterias de Lítio-Íon, são mais seguras e mais baratas, mesmo assim, elas veem sendo trocadas pelas baterias de Lítio-Íon, que possuem mais energia específica e uma maior durabilidade.

Baterias de Níquel Hidreto Metálico usam como material no eletrodo positivo o Níquel Oxi-Hidróxido que é o mesmo utilizado para o eletrodo positivo da bateria de Níquel Cádmio, sendo a principal diferença entre elas, a liga metálica do eletrodo negativo (ROOT, 2010).

¹ Efeito Memória é um fenômeno sofrido por alguns tipos de baterias, que reajustam suas propriedades elétricas para uma determinada profundidade de descarga, devido a receber vários ciclos de descarga incompletos.

Para o elemento do elétrodo negativo existe uma grande gama de metais, classificados de acordo com dois grupos, AB_2 e AB_5 , onde A e B são diferentes ligas metálicas (ROOT, 2010). Na Tabela 2, são apresentadas as principais características de uma célula genérica de Níquel Hidreto Metálico.

Tabela 2 – Características de uma célula genérica de Níquel Hidreto Metálico

Especificações	Bateria de NiMH
Energia Específica (Wh/kg)	60 – 120
Ciclos de Vida (a 80% de descarga)	300 – 500
Tempo de Carga Rápida (h)	2 – 4
Taxa de Auto-Descarga (por mês)	30%
Tolerância a Sobrecarga	Baixa
Tensão Nominal (por célula)	1,25 V
Segurança de Utilização	Média - Requer alguns dispositivos de segurança.

Fonte: Adaptado de (Buchmann, 2011)

2.1.4 Baterias de Lítio-Íon

As baterias de Lítio-íon, são um dos tipos de baterias mais utilizadas atualmente, encontrada em uma grande quantidade de dispositivos tecnológicos no mercado. Estas têm inúmeras aplicações, se destacando em equipamento eletrônicos portáteis, sistemas de armazenamento de energia e veículos elétricos. Sendo sua demanda atual maior que a demanda dos outros tipos de baterias do mercado e suas aplicações tendem a aumentar, pois ela está sendo constantemente estudada (ROOT,2010).

Foi introduzida no mercado no começo da década de 70, as baterias primárias de Lítio tinham características promissoras em termos de energia específica e densidade de energia, logo houve interesse em torná-las

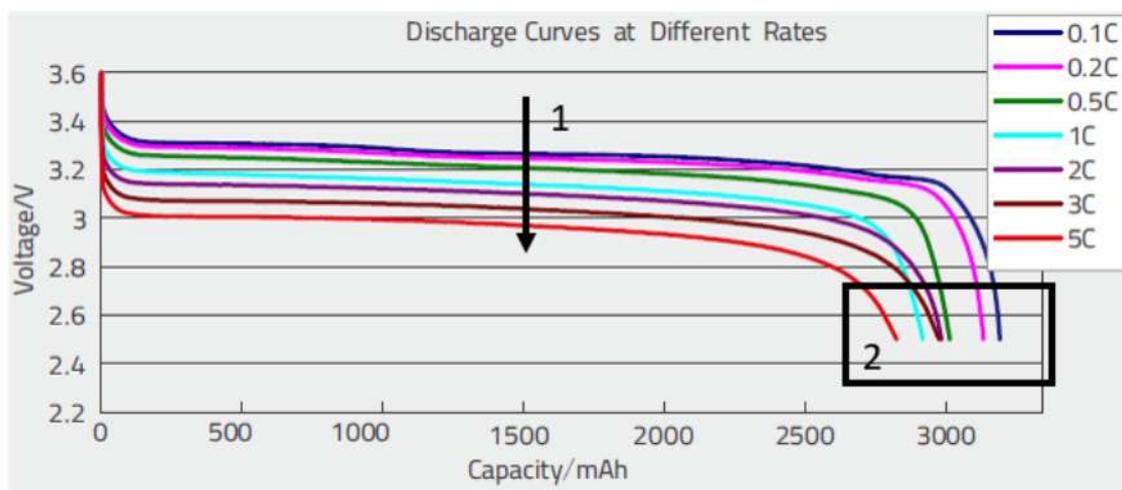
recarregáveis. Inicialmente a pesquisa baseou-se em uso de lítio metálico no eletrodo negativo, o que proporcionava excelente densidade de energia, mas formavam-se dendritos², que com os ciclos de vida da bateria, se espalhavam e passavam pelo separador causando eventuais curtos-circuitos. Para resolver o problema, começou a se utilizar de eletrodo negativo materiais a base de carbono, como grafite, *coke*, *hard carbon* e outros (ROOT, 2010).

Apenas no começo dos anos 90, em 1991 que as baterias de Lítio-íon foram lançadas comercialmente, pela *Sony* e desde então, vem sofrendo constantes aprimoramentos. Seu mercado está em contínuo aumento, devido ao interesse global pelos EVs e a crescente necessidade de armazenamento de energia em alta escala, também associado com a produção de energia via fontes renováveis. (ROOT, 2010).

Quanto as propriedades químicas, são compostas de células de íons de lítio, que utilizam no eletrodo negativo matérias a base de carbono, como o grafite em sua maioria, devido ao grafite permitir uma curva de descarga mais plana, como pode ser observado na Figura 8.

Para o eletrodo positivo são utilizados óxidos de metais ou compostos de fosfato, sendo três deles os mais utilizados: óxido de lítio cobalto, óxido de lítio-manganês e fosfato de ferro-lítio. O material escolhido para o eletrodo positivo, definirá determinadas características para a bateria (ROOT, 2010).

Figura 8 - Perfil de descarga de uma célula de Lítio de 3000mAh aproximadamente, para taxas de descarga diferente



Fonte: PVsyst, s.d.

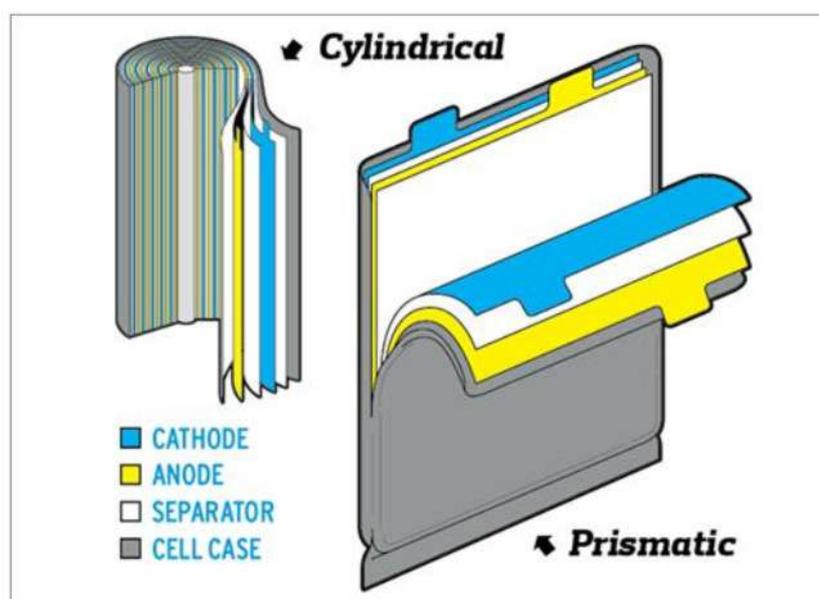
² Dendritos são depósitos de Lítio que se formam na superfície dos eletrodos durante o ciclo de carga e a cada ciclo crescem, podendo levar a avaria da célula.

Na curva de descarga de uma célula de Lítio para diferentes taxas de descarga, demonstrada na Figura 8, o numeral 1 indica a queda de tensão conforme a taxa de descarga aumenta e o numeral 2, por sua vez, indica a queda de capacidade de energia à medida que a taxa de descarga aumenta.

As células de Lítio-Íon funcionam com base em um processo químico chamado de intercalação, onde os íons de lítio são adicionados à estrutura molecular do material do eletrodo. Quando o ânodo de uma célula é reduzido durante o ciclo de carga, os íons de lítio são intercalados entre as camadas individuais de grafite (DUARTE, 2013).

O primeiro material utilizado para o cátodo foi o óxido de lítio cobalto, que continua sendo bastante utilizado atualmente. Possuindo uma estrutura organizada em camadas, como apresentado na Figura 9, na qual os íons de Lítio são inseridos entre as camadas de cobalto e oxigênio, reação análoga à do ânodo, como relatado anteriormente (DUARTE, 2013).

Figura 9 – Ilustração das formas construtivas cilíndrica e prismática de uma célula de bateria de Lítio-Íon



Fonte: Blog das baterias, 2013

Células de íons de Lítio cilíndricas (*Cylindrical lithium-ion cells*), são encontradas em *notebooks*, câmeras digitais e veículos elétricos em sua maioria. A Figura 10 apresenta exemplos de células cilíndricas.

Figura 10 – Células de Lítio cilíndricas, diversas, recicladas 18650



Fonte: Próprio Autor

Porém, nem todos os materiais utilizados como cátodo nas baterias de Lítio-Íon se estruturam em camadas, como é o caso do fosfato de ferro-lítio e do lítio-manganês, que possuem estruturas tridimensionais, sendo os íons de Lítio colocados entre os átomos.

Como citado anteriormente, diferentes materiais, trarão diferentes características para a bateria, em relação a variações na capacidade de energia, densidade de energia, densidade de potência, estabilidade e até segurança, sendo o caso das baterias de fosfato de ferro-lítio, que devido ao seu fosfato de ferro-lítio são mais estáveis e seguras, possuindo mais ciclos de vida (DUARTE, 2013).

Dentre as principais características desse tipo de baterias pode-se ressaltar, sua longa vida útil, alta densidade de energia, baixo peso quando comparado aos outros tipos de baterias que não de Lítio, são menos sensíveis as variações de temperatura e tem baixo custo de manutenção. Porém possuem um alto custo de implementação e se comparado aos outros tipos de bateria, possuem baixo nível de segurança, apresentando pouca tolerância à abusos em sua utilização (BUCHMANN, 2011).

Ainda no começo dos anos de 70, começou a surgir outra tecnologia de baterias a base de íons de Lítio, as baterias de Lítio Polímero, estas utilizavam como eletrólito um polímero sólido, que era muito parecido com uma película de plástico. Esta foi sinônimo de segurança, devido a não presença de líquidos, que pudessem vazarem no interior da bateria e inflamar, o que também possibilitava a

produção de baterias ainda mais finas. Porém, o Lítio Polímero apresentava baixa condutividade à temperatura ambiente, tornando-se necessário utilizar estas sobre altas temperaturas, o que dificultava muito em aplicações. A solução foi adicionar um eletrólito na forma de gel (BERGVELD, 2001).

Atualmente são comercializadas utilizando uma membrana porosa de polietileno ou um separador preenchido com um polímero em gel (Figura 11). As reações químicas são muito parecidas com as de Lítio-Íon convencionais.

Figura 11 – Forma comercial de baterias de Lítio Polímero atualmente

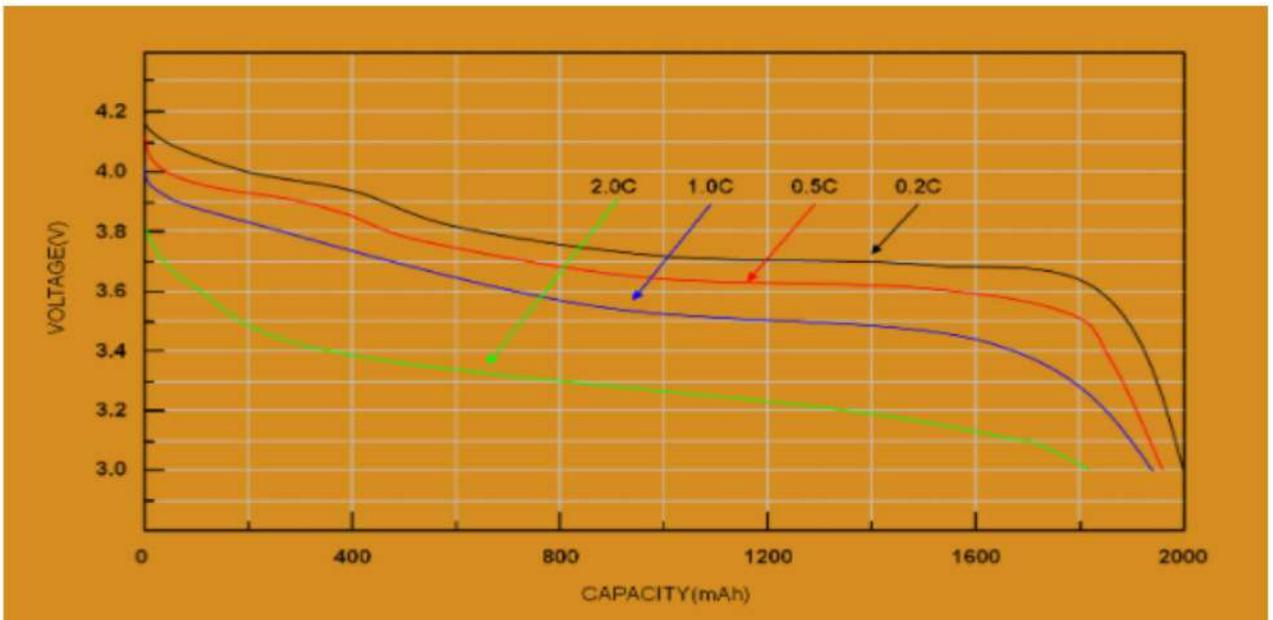


Fonte : Site do fabricante *BNKPower*.

As células de Lítio Polímero têm um preço relativamente mais alto se comparado aos outros tipos de baterias de Lítio, mesmo que apresente menor densidade de energia e menos ciclos de vidas, tendo a sua espessura como principal vantagem, sendo utilizada principalmente em aparelhos portáteis (DUARTE, 2013).

Na Figura 12 é possível analisar a curva de descarga de uma célula de Lítio Polímero.

Figura 12 - Perfil de descarga de uma célula de Lítio Polímero, para taxas de descarga diferentes



Fonte : Site do fabricante *BNKPower*

Na Tabela 3 é apresentado um breve comparativo entre estes três tipos de baterias de Lítio

Tabela 3 – Especificações baterias de Lítio por tipos

Especificações	Bateria de Lítio - Cobalto (LiCoO ₂)	Bateria de Lítio - Manganês (LiMnO ₄)	Bateria de Lítio - Fosfato-Ferro (LiFePO ₄)
Energia Específica (Wh/kg)	150 – 190	100 – 135	90 – 120
Ciclos de Vida (a 80% de descarga)	500 – 1000	500 – 1000	1000 – 2000
Tempo de Carga Rápida (h)	2 – 4	< 1	< 1
Taxa de Auto-Descarga (por mês)	< 10%		
Tolerância a Sobrecargas	Baixa		
Tensão Nominal (por célula)	3,6 V	3,8 V	3,3 V
Segurança de Utilização	Baixa – muito pouco tolerantes a abusos na sua utilização		

Fonte: Adaptado de (Buchmann, 2011)

2.1.4.1 Precauções e cuidados ao utilizar com baterias de Lítio-Íon

Como mencionado anteriormente, as baterias de Lítio-Íon apresentam riscos na sua utilização e alguns cuidados precisam ser tomados pelo usuário, tais como:

- Nunca carregar ou descarregar baterias que estão ou possam estar danificadas. Estas devem ser imediatamente descartadas em lugar devido;
- Cuidado ao utilizar baterias de segunda mão, nunca se sabe o estado em que a bateria se encontrava, por isso é necessário sempre o uso de equipamentos compatíveis com as baterias de Lítio-Íon e que apresentem mecanismos de segurança;
- É importante que todas as células conectadas em série tenham aproximadamente o mesmo nível de tensão. Tensões muito diferentes entre as células podem levar a bateria a ficar sobrecarregada ou descarregada em demasia;
- Enquanto as baterias estiverem armazenadas, carregando ou descarregando, é aconselhável manter uma distância de segurança;
- Nunca deixar a bateria sem supervisão enquanto está carregando;
- Perceber possíveis alterações físicas no corpo da bateria, como furos, cortes, estufamentos e outros;
- As baterias de Lítio-Íon devem ser armazenadas em temperatura controlada;

Algumas pessoas acreditam que as baterias de Lítio devem ser completamente carregadas, depois completamente descarregadas para depois realizar uma recarga completa novamente. É um pensamento equivocado, a correta prática é a de manter os níveis de tensão constantes todo tempo, o que não danifica

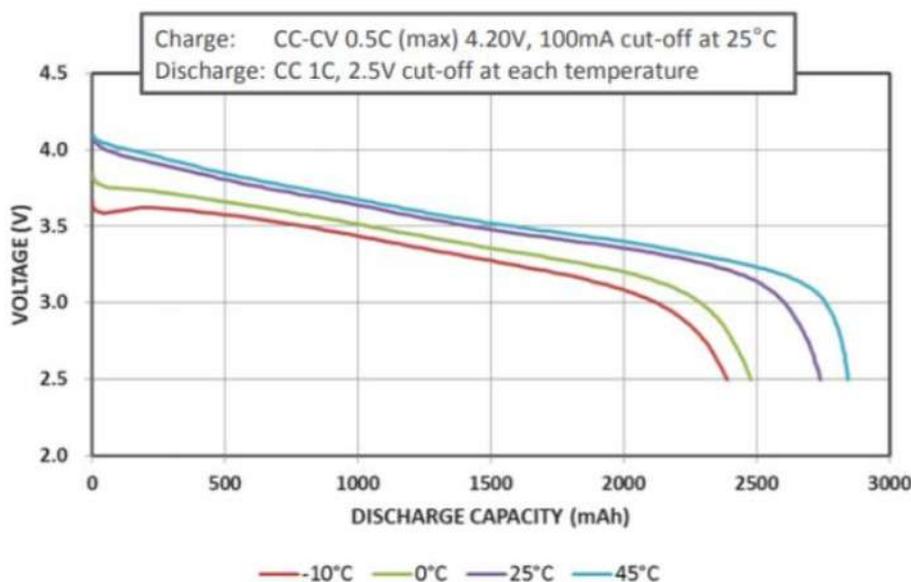
a bateria e ajuda a ter disponível a bateria sempre carregada para uso (BNK POWER, 2020).

Para que haja um maior nível de proteção e confiabilidade, além dos cuidados citados, deve ser utilizado sistemas de gerenciamento de baterias, que serão abordados na Seção 2.2.

2.1.4.2 Temperatura e seus efeitos nas células de Lítio-Íon

Toda bateria possui restrições de temperatura, para o Lítio não poderia ser diferente. As células mais antigas possuíam temperaturas bem restritas, já as células mais modernas normalmente podem ser armazenadas entre -20 e 60 °C. É saudável que a célula gere pouco calor no processo de carga e que a temperatura ambiente não seja alta a ponto de ultrapassar o *range* máximo. O efeito da temperatura na capacidade durante a descarga da bateria pode ser observado pela Figura 13 (WOLLINGER, 2021).

Figura 13 - Curva de descarga de célula de Lítio NCR185650PF para diferentes temperaturas



Fonte: Panasonic, 2020

É notável que, a temperatura tem influência direta sobre a tensão e conseqüentemente sobre a capacidade da célula. Sistemas críticos que fazem uso de bateria de Lítio como veículos elétricos e satélites, tem sistemas de resfriamento

e/ou aquecimento para garantir a segurança e otimizar o ponto de operação (WOLLINGER, 2021).

2.1.4.3 Métodos de carga e descarga de baterias de Lítio-Íon

Quando falado de processo de carga de baterias de Lítio é importante frisar que o tempo de operação é o principal ou um dos principais fatores para determinar a eficiência do carregador em questão. Também que, diferentes tipos de bateria suportam diferentes taxas de carregamento. Os processos de carga devem ser feitos com precisão e cuidado, sendo responsável direto pela vida útil da bateria (ROOT, 2010).

Alguns métodos são mais comuns e indicados do que outros, sendo o tipo da bateria o fator determinante. Os métodos serão brevemente mencionados e explorados aqueles que convém para o trabalho.

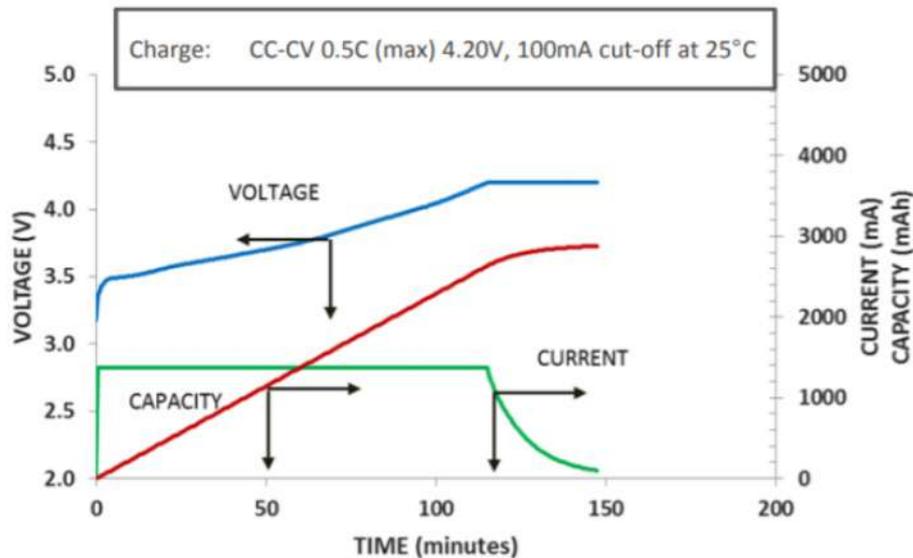
Os métodos de carga podem ser visto de forma completa pelo trabalho de (Schmitt, 2021), que além de mostrar as formas de carregamento usuais, traz também um trabalho sobre o carregamento de baterias com corrente pulsada.

Quando a bateria é fabricada, uma carga inicial é aplicada de forma que os íons de Lítio se movam do cátodo para o ânodo.

Dentre os métodos de carregamento os mais conhecidos estão, o CV, o CC e o CC-CV, sendo este último o mais usual e indicado pelos fabricantes para baterias de Lítio, é o método utilizado neste trabalho.

O método CC-CV é dividido em três estágios, sendo os dois primeiros em corrente constante (CC) e o último estágio em tensão constante (CV), como mostrado pela Figura 14, que apresenta os parâmetros de recarga de uma célula de Lítio, NCR18650PF da Panasonic (WOLLINGER, 2021), de 2700 mA.

Figura 14 - Curva característica do Método CC-CV de recarga de baterias de Lítio para uma célula da Panasonic



Fonte: Panasonic, 2020

Ilustrado pela Figura 14, durante o estágio de carga CC, é utilizada uma corrente a uma taxa de 0,5C ou seja, 1350mA. Já no estágio CV é utilizada uma tensão constante de 4.2V. O *Cut-Off*, ou fim da recarga, é quando a célula estiver drenando apenas 100mA de corrente, que é um parâmetro estipulado pelo fabricante para indicar o fim do estágio de carga da célula.

O estágio CC é muito importante para realizar a recarga da célula de forma segura, quando esta se encontra com baixa tensão, de forma que sejam evitadas sobrecargas nas células, por isso é recomendado que o banco seja montado na associação apresentada pela Figura 18c, para que haja um balanceamento físico entre as células. Para os bancos de baterias, o balanceamento das células, também é feito com o uso de sistemas de gerenciamento de baterias.

Tratando dos métodos de descarga de baterias de Lítio, em sua grande maioria são determinados pela prática em que a bateria será utilizada. Quando a célula de Lítio é descarregada, os íons se movem do ânodo para o cátodo passando pelo eletrólito, descarregando elétrons no lado do ânodo.

É possível encontrar na literatura alguns tipos de descarga, utilizadas a título de experimentos, testes e/ou obtenção de parâmetros. O método de descarga de corrente constante é um deles, para isso, é necessário fazer uso de um circuito de corrente constante, uma carga eletrônica.

2.2 BANCO DE BATERIAS DE LÍTIO-ÍON

Um banco de baterias é composto por um arranjo série e/ou paralelo entre as células, mostrado pela Figura 15, para assim aumentar a quantidade de energia disponível para uma dada aplicação, além da escolha direta da tensão com base no número de células em série.

São realizadas associações para atender aos mais diversos tipos de projeto. Normalmente, utiliza-se a letra “S” ao número de células associadas em série e a letra “P” para o número de células paralelas a estas em série.

Figura 15 - Bancos de baterias Lítio, composto por sete associações em série e cinco em paralelo, 7S5P



Fonte: VoltaPlex, 2021

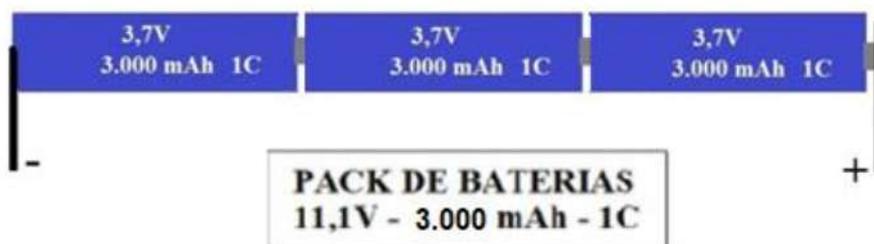
Neste trabalho, deseja-se utilizar um banco de baterias com tensão de 12V e capacidade de 30Ah, o que requer a associação de células em série e paralelo, conforme será abordado na Seção 3.0.

2.2.1 Associações série de células

Na associação em série de células de Lítio-Íon, a tensão de cada célula é somada, mas a quantidade de corrente permanece a mesma, conforme o exemplo mostrado na Figura 18.

A título de exemplo, serão utilizadas células de Lítio, com 3,7V de tensão, 3Ah de capacidade e 1C de Taxa-C.

Figura 16 - Células de Lítio de 3,7V associadas em série, 3S



Fonte: Adaptado de (RONTEK, s.d.)

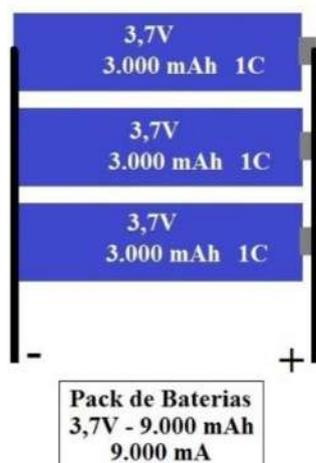
Como ilustrado pelo exemplo da Figura 16, é possível analisar que o nível de tensão das três células foi somada, mas a corrente e sua capacidade de energia permaneceu em seu valor individual por célula, 3.000 mAh, assim como a Taxa-C que manteve seu estado individual por célula de 1C.

2.2.2 Associações paralelas de células

Na associação paralela de células de Lítio, a quantidade de energia do banco é igual a soma da quantidade de energia de cada pilha assim como a corrente máxima total será a soma das correntes máximas de cada célula, conforme o exemplo mostrado na Figura 17.

A título de exemplo, serão apresentadas células de Lítio, com 3,7V de tensão, 3Ah de capacidade e 1C de Taxa-C.

Figura 17 - Células de Lítio de 3,7V associadas em paralelo, 1S3P



Fonte: Adaptado de (RONTEK, s.d.)

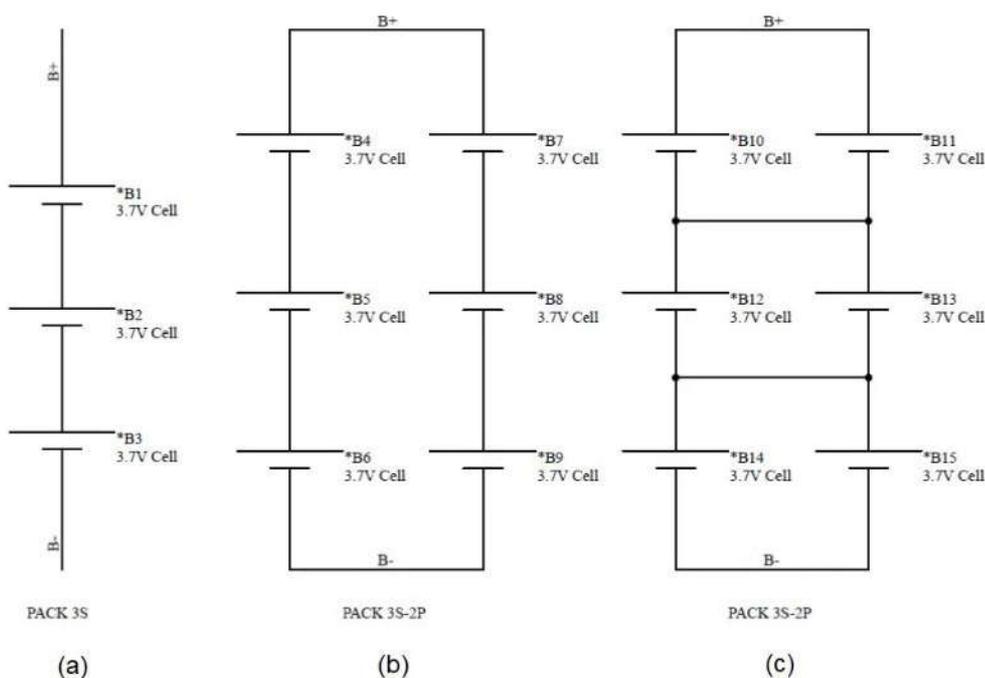
Como ilustrado pelo exemplo da Figura 17, é possível analisar que o nível de tensão permaneceu em seu valor de 3,7V, já a corrente máxima, capacidade de energia de cada célula foi somada, resultado em um valor três vezes o original de cada célula de Lítio, 9000mA, 9000mAh.

2.2.3 Múltiplas associações em série e associações paralelas

No projeto de um banco de baterias, vários fatores devem ser levados em conta, como é o caso exemplificado pela Figura 18. Todas as associações resultam em uma tensão nominal de 11,1V, se cada célula tiver uma capacidade individual de 1Ah, equivalente a 3,7Wh, a associação 3S nessas condições, teria uma corrente nominal de 1A, mas com 11.1V, logo sua capacidade de energia associada será de 11.1Wh e 1Ah (WOLLINGER, 2021).

Já nos outros casos exemplificados na Figura 18(b) e na Figura 18(c), as associações de células 3S2P, tem-se uma corrente nominal duas vezes maior que as individuais das células, 2A com a mesma tensão, logo, o valor da capacidade de energia da associação 3S2P em ambos os casos será de 22,2Wh e 2Ah.

Figura 18 - Associação de três células de Lítio de 3,7V: (a) em série, (b) e (c) com duas células em paralelo, 3S2P



Fonte: Adaptado de (Wollinger, 2021)

Porém, algo que deve ser levado consideração, na hora de construir um banco de baterias é que, por natureza, as células são desiguais, por isso a associação do exemplo da Figura 18(c) é a mais indicada. Esta faz com que o desequilíbrio físico entre as células seja menor, desempenhando melhor funcionamento que a segunda associação do exemplo, para quantidades de corrente maiores.

2.3 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE BATERIA

Com a evolução da tecnologia de baterias e suas aplicações, os sistemas de gerenciamento de baterias (*battery management systems* – BMS) tornaram-se indispensáveis. Com o forte crescimento do mercado de EVs(*Electric Vehicle*) os BMS vêm ganhando cada vez mais importância, isso ocorre, devido ao custo das baterias, que representa grande parte do preço final do veículo. Também estão ligadas diretamente, se analisando a parte de veículos elétricos, a alcance que o veículo consegue percorrer sem precisar ser carregado, assim como o número de vezes que ele pode ser carregado, os ciclos de vida da bateria (BRANDL ET al., 2012)

O sistema de gerenciamento de baterias tem como seu principal objetivo proteger as baterias de sobrecargas, e para isso realiza a equalização de carga, controle de tensão e corrente.

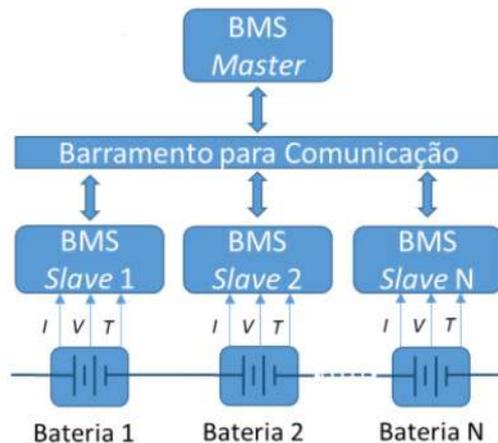
2.3.1 Estrutura de um sistema de gerenciamento de bateria

Sobre a estrutura construtiva dos BMS, possuem dois tipos de configurações distintas, que irão variar com o tipo de aplicação.

- Distribuída: Neste tipo de estrutura, mostrada pela Figura 19, os BMS são divididos em módulos, chamados dos módulos *slave*. Cada BMS *slave* é responsável pela amostragem e atuação de um conjunto de células de baterias, se comunica com o módulo *master*, que irá gerenciar os demais módulos *slave*, assim como a comunicação com

o usuário (MUNSON, 2011). Este tipo de configuração é normalmente utilizada quando tem-se um elevado número de baterias ou uma situação em que se espera aumentar o número de baterias (DUARTE, 2013).

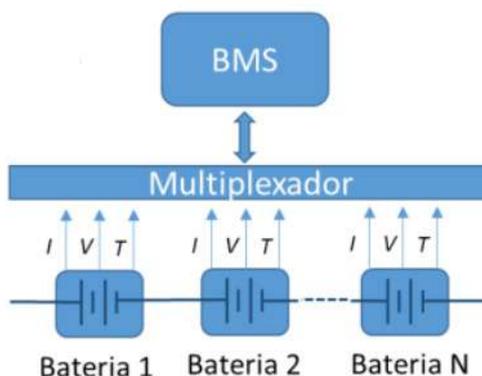
Figura 19 - Estrutura distribuída de um BMS genérico com N baterias



Fonte: Adaptado de (Duarte, 2013)

- Centralizada: Neste tipo de estrutura, mostrada pela Figura 20, as baterias são diretamente ligadas entre si (MUNSON, 2011). Solução prática, destinada a aplicações com números relativamente baixos de baterias, assim como grande capacidade de processamento do controlador que irá fazer a amostragem, processamento e atuação sobre as baterias (DUARTE, 2013).

Figura 20 - Estrutura centralizada de um BMS genérico com N baterias



Fonte: Adaptado de (Duarte, 2013)

2.3.2 Funções dos sistemas de gerenciamento de bateria

É possível encontrar atualmente BMS com diversas funções, estando ligados diretamente a sua aplicação. Como visto, existem tipos diferentes de baterias que tem consigo suas características distintivas, então, essas funções exercidas pelo sistema de gerenciamento estarão ligadas ao tipo de bateria utilizada (CHENG et al., 2011).

A seguir serão apresentadas as funções encontradas nos sistemas de gerenciamento de baterias e seus conceitos, que serão brevemente abordadas neste trabalho, mas encontram-se de forma completa no trabalho de (Oening, 2022).

- Balanceamento das células;
- Estimação do estado de carga (SoC – *State of Charge*) e estimação de estado de vida (SoH – *State of Health*);
- Controle e monitoramento dos processos de carga e descarga da bateria;
- Medição de tensão e corrente por célula;
- Controle de temperatura;

2.3.2.1 Técnicas de balanceamento

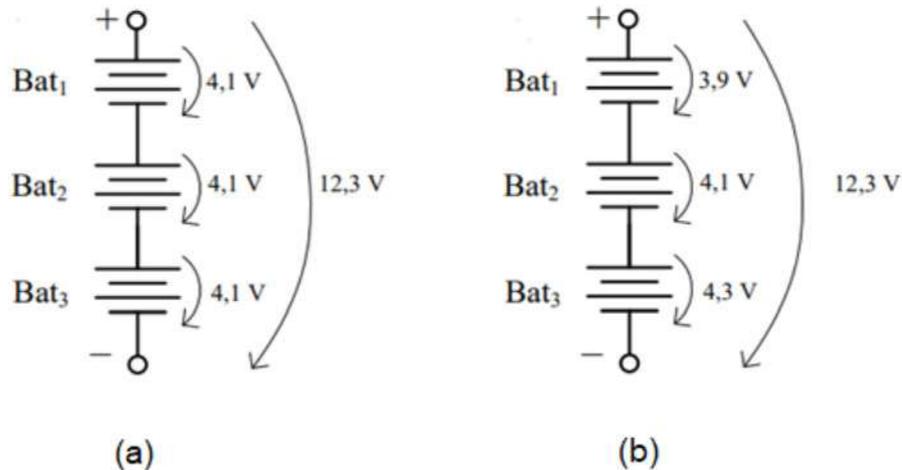
Como visto anteriormente no Seção 2.2.3, quando associadas, células cria-se um desequilíbrio natural entre elas, ainda mais quando se tratam de células que foram recondiçionadas e sem muita padronização.

As associações em série, junto com a existência de variações na capacidade e resistência de célula para célula, são potencialmente nocivas para o funcionamento do banco de baterias e para as células (BENTLEY, 1997).

Analisando apenas a tensão nos terminas de um banco de baterias, pode-se ter a impressão de que este está devidamente carregado, mas nem sempre é verdade, pois podem existir desequilíbrios entre as células, de formas que uma esteja compensando a tensão da outra, como mostrado no exemplo da Figura 21 (SPELTINO; STEFANOPOULOU; FIENGO, 2010). Na Figura 21(a) as baterias estão

em equilíbrio e na Figura 21(b) as células encontram-se em desequilíbrio, Bat1 está sub-carregada e Bat3 está sobrecarregada.

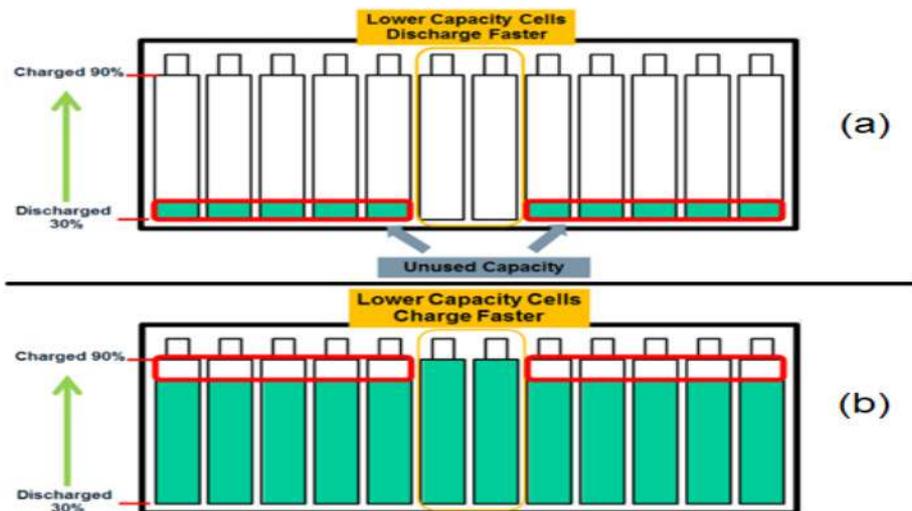
Figura 21 - Exemplo de um banco de baterias de 12.3V, com células em equilíbrio (a) e desequilíbrio (b)



Fonte: Adaptado de (Duarte, 2013)

Durante o processo de descarga, o desequilíbrio entre as células pode levar com que alguma célula do banco alcance um nível de tensão não aceitável, podendo danificar esta e/ou outras, e durante o processo de carga, as células com menos capacidade serão carregadas mais rápido, podendo sofrer sobrecargas. Os processos de carga e descarga, como descritos, podem ser acompanhados pelo exemplo da Figura 22.

Figura 22 - Células desbalanceadas em um banco de baterias em processo de descarga e carga, respectivamente



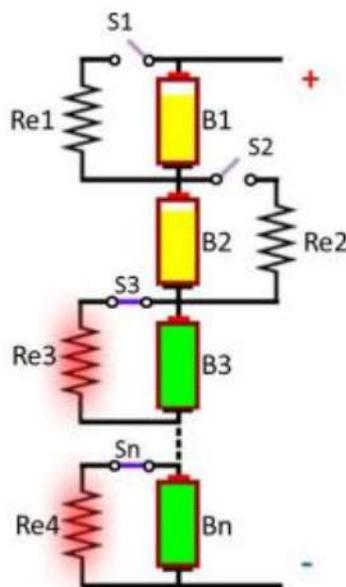
Fonte: Adaptado de (Analog Devices, 2021)

Como citado anteriormente, as baterias, trazem consigo características distintas, como é o exemplo das baterias de Chumbo-Ácidas em relação as de Lítio, que são muito melhores em suportarem sobrecargas, possuindo até mecanismos de tolerância, logo os BMS se tornam essenciais quando se faz uso de baterias de Lítio (BRANDL ET al., 2012).

Para o balanceamento das células são utilizadas técnicas que podem ser divididas em duas categorias, sendo elas, ativa e passiva, que serão brevemente abordadas aqui, mas são tratados de forma mais completa por (Lorencetti, 2018).

Nos métodos de equalização passiva de baterias, a energia excedente, como nas células do meio na Figura 22 (b), é dissipada por elementos resistivos, até que todas fiquem carregadas igualmente (DUARTE, 2013). Dos métodos passivos os mais comuns são, *shunt* resistivo e o *shunt* resistivo controlado. A topologia do método *Shunt* Resistivo é a mais simples, em questão de elementos de circuito, sendo caracterizada pela presença de uma resistência em paralelo a cada bateria. O método controlado é análogo ao anterior, mas com a presença de chaves, que fecham para dissipar energia das baterias mais carregadas, como é mostrado pela Figura 23, se tratando de uma funcionalidade esperada pelo BMS a ser usado.

Figura 23 - Método shunt resistivo controlado



Fonte:(Lorencetti, 2018)

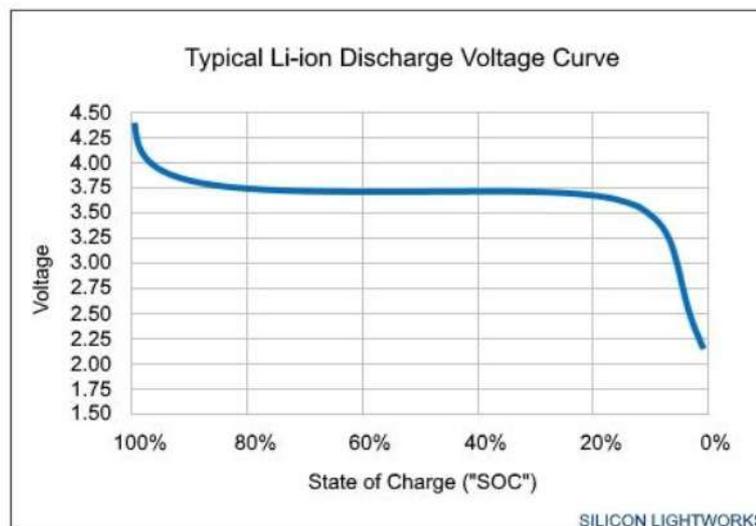
Nos métodos de equalização ativos de baterias, a energia é transferida da célula de maior carga para as de menor carga, até que todas se encontrem em equilíbrio, dissipando pouca energia. Logo, as técnicas de equalização ativas de baterias são muito mais eficientes na questão energética que as passivas (DUARTE, 2013). Os métodos ativos mais conhecidos são: capacitores comutados, capacitores comutados de dupla camada, transformador compartilhado e transformadores em paralelo.

2.3.2.2 Estimação do estado de carga

A estimação do estado de carga (*State of Charge* – SoC) de uma bateria é uma função essencial nos BMS, sendo responsável pela determinação da capacidade da bateria no estado que se encontra, relativo à sua capacidade nominal (CHO e JONGHOON, 2011). O SoC, depende de vários parâmetros para ser estipulado corretamente, como, temperatura, eficiência de carga e descarga, Taxa-C dentre outros. Existem diversas técnicas para estimar o Estado de Carga de uma bateria. Os mais utilizados são: Medição Direta, Métodos de Contagem, Sistemas Adaptativos e Métodos Híbridos (CHANG, 2013).

Na Figura 24, é possível observar o SoC de uma célula de Lítio-Íon genérica, com 3,7V.

Figura 24 - Estado de Carga de uma célula de Lítio-íon genérica de 3,7V



Fonte: Silicon Lightworks, 2020

2.3.2.3 Estimação do estado de vida

A estimação do estado de vida (*State of Health – SoH*) de uma bateria, é definida pela capacidade de armazenar energia, fornecer e receber corrente e reter carga, relativo à sua capacidade inicial (XING et al., 2011). Com o envelhecimento da bateria, devido a seus ciclos de carga e descarga, que resultam em mudanças químicas, tornando as baterias menos eficientes, até o momento que esta não consiga mais exercer sua função e precise ser trocada. Por isso é tão importante a realização da estimação do estado de vida da bateria, pois por meio dele é possível saber o momento certo de realizar a troca da bateria, sem maiores danos ao sistema e as outras baterias. (CHENG et al., 2011).

Existem vários meios de determinar o SoH, mas não se tratam de fato de métodos bem estabelecidos (CHO e JONGHOON, 2011). Normalmente o estado de vida é estipulado pela medição da impedância em uma frequência única, que geralmente é 1KHz, que pode permitir a identificação de células defeituosas (BARSUKOV, 2006).

Outra solução é a medição da capacidade da bateria e calcular a relação entre a capacidade atual e a nominal da bateria (LE e TANG, 2011). Após mil ciclos completos uma bateria de Lítio tem em média, seu SoH reduzido para 80%.

2.3.2.4 Dispositivos de monitoramento

Um BMS deve ser capaz de realizar o monitoramento de tensão, corrente e temperatura das baterias (CHENG et al., 2011).

A medição de tensão geralmente é feita por meio de medição direta, via sensores de efeito Hall ou por optoacopladores lineares. A medição de corrente é feita com o uso de resistências shunt ou por sensores de efeito Hall. Já para a medição de temperatura, é comumente encontrado termistores NTC (*Negative Temperature Coefficient*) ou PTC (*Positive Temperature Coefficient*).

3 DESENVOLVIMENTO E TESTES DE PACK DE BATERIAS DE LÍTIO

A metodologia de projeto adotada para este trabalho será dividida em 5 partes: obtenção das células de Lítio-Íon, avaliação das células, projeto, escolha do BMS, testes e análise dos resultados obtidos.

3.1 OBTENÇÃO DAS CÉLULAS DE LÍTIO-ÍON

Para a obtenção das células foi realizada a coleta em descartes tecnológicos de baterias de *notebook*, em sua maioria composta por 4 a 8 células de Lítio, como mostradas nas Figuras 25, 26 e 27. Posteriormente a obtenção destes materiais, foram abertos os encapsulamentos e retiradas as pilhas de dentro do compartimento.

Figura 25 - Bateria de notebook da marca Asus, modelo A32-M50 de 11,1V e 4800mAh, com o encapsulamento lacrado



Fonte: instructables, s.d

Figura 26 - Bateria de notebook da marca Asus com o encapsulamento parcialmente aberto



Fonte: instructables, s.d.

Figura 27 - Bateria de notebook da marca Asus com o encapsulamento aberto, demonstrando a presença de 6 células de Lítio, de forma 3S2P



Fonte: instructables, s.d.

3.2 AVALIAÇÃO DAS CÉLULAS DE LÍTIO-ÍON

Serão escolhidas as células que se encontram em melhores condições, para isso, é feita primeiramente uma análise visual, buscando eventuais rompimentos ou danos aparentes, então é usado um equipamento comercial para fazer os testes. O aparelho utilizado neste trabalho será o LiitoKala Lii-500, mostrado na Figura 28, que é um carregador e analisador de baterias, para células cilíndricas de Lítio.

Figura 28 - Carregador e analisador LiitoKala Lii- 500, conectado com 4 células de Lítio-Íon



Fonte: Próprio Auto

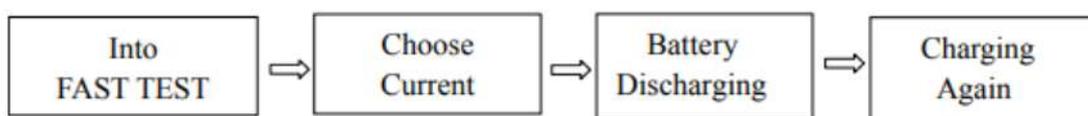
As informações apresentadas pelo equipamento são as tensões das células, resistência e quantidade de energia armazenada, possuindo quatro canais, um para cada célula. Para as opções de teste é possível escolher a corrente de carga e

descarga desejada, sendo 250mA, 500mA, 750mA e 1000mA, para carga e 250mA e 500mA para a descarga.

Neste trabalho todos os testes serão realizado com uma corrente de 1000mA de carga e de 500mA de descarga, basicamente por uma questão de tempo, o teste é feito de 4 em 4 células e tem uma duração média de 9 horas. O Lii- 500 ainda conta com duas opções de testes, o FAST TEST e o NOR TEST.

O FAST TEST, como mostrado na Figura 29, consiste em um teste de carga e descarga para medir a capacidade das células de Lítio, começando pela descarga das baterias e em seguida carregando-as até a máxima capacidade de forma que seja possível determinar a sua capacidade de energia.

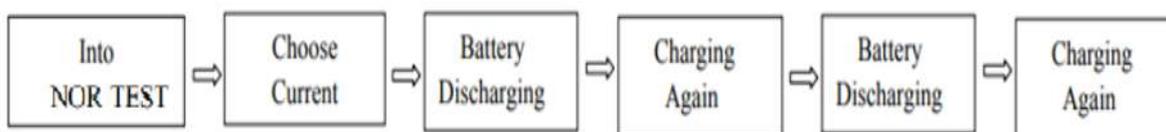
Figura 29 - Processo do FAST TEST no carregador e analisador Lii-500



Fonte: Adaptado de (kupifornar.com, s.d.)

Já o NOR TEST, Figura 30, conta com um estágio a mais, que é o de descarga novamente, após o estágio de carga, tornando ele um teste mais preciso. Todos os testes realizados nesta parte do trabalho, foram por meio do NOR TEST.

Figura 30 - Processo do NOR TEST no carregador e analisador Lii-500



Fonte: Adaptado de (kupifornar.com, s.d.)

As duas opções coletam os mesmos dados, mas o NOR TEST é mais completo e conta com um estágio a mais, porém é bem mais demorado.

Depois de avaliar todas as células obtidas e classificá-las, como demonstrado de forma exemplificada na Tabela 4 e na Figura 31, serão escolhidas

as que estiverem em melhores condições de capacidade e que melhor atendam as características de projeto.

Tabela 4 – Parâmetros das células de Lítio obtidos via teste pelo equipamento Lii – 500, exemplificado NOR TEST

Pilha (nº)	Tensão (V)	Resistência (mR)	Capacidade (mAh)	Duração (h)
1	4.2	18	2049	04:02
2	4.19	24	1682	03:19
3	4.2	50	1574	03:06
4	4.19	19	2325	04:35
5	4.21	125	1968	03:53
6	4.19	29	2240	04:25
7	4.19	50	1887	03:43
8	4.2	24	2025	04:00
9	4.2	48	570	01:07
10	4.2	31	2103	04:09
11	4.2	106	1363	02:41
12	4.19	39	1777	03:30
13	4.2	25	1991	03:56
14	4.2	100	1237	02:26
15	4.2	37	1771	03:29
16	4.2	61	1160	02:17
17	4.2	125	526	01:02
18	4.2	21	2245	04:26
19	4.2	33	1947	03:50
20	4.2	28	2386	04:42
21	4.2	125	742	01:27
22	4.2	37	166	00:19
23	4.19	22	1707	03:22
24	4.19	43	1664	03:17
25	4.19	79	1620	03:12

Fonte: Próprio Autor

Figura 31 - Células de Lítio-Ion recicladas, após serem testadas e classificadas



Fonte: Próprio Autor

Vale ressaltar que quando explicado a funcionalidade dos testes e o tempo médio de realização destes, tem-se em mente que a célula está totalmente ou parcialmente carregada, mas não é o caso das células deste trabalho, que são recicladas e quase sempre estão praticamente totalmente descarregadas. Por isso é preciso antes de cada teste, realizar o processo de carga das células, aumentando muito o tempo do processo, que não é contabilizado pelo aparelho.

Realizando uma análise da Tabela 4, é possível reparar uma relação direta entre o tempo de teste e a capacidade das células, ou seja, quanto mais tempo duram os testes de carga e descarga, maior é a quantidade de energia retida por célula. Outro fator possível de análise, é a resistência interna apresentada pelas células, que por se tratarem de materiais reciclados, possuem resistências internas diversas, com valores substancialmente altos se comparados ao de células novas, que possuem em média menos de 20mR.

Para a realização deste projeto, foram testadas inúmeras células, destas, 114 foram registradas e separadas para o protótipo, apresentados no Apêndice A. As células que foram descartadas, devido a encontrarem-se em proteção, estado em que não é possível a análise pelo equipamento ou por algum tipo de defeito que fez com que esta não conseguisse mais armazenar energia. A Figura 32 mostra esta condição apresentada pelo Lii-500, após efetuado o NOR TEST.

Figura 32 - Informativo do equipamento Lii-500, relatando o fim do NOR TEST com Capacidade igual a 0 mAh



Fonte: Próprio Autor

3.3 PROJETO

Como já citado anteriormente, na Seção 2.3, pretende-se associar células de maneira que estas formem um banco de baterias com propriedades de 12V e 30Ah.

Nesta seção, a princípio, foi realizada uma simulação via site chamado, POWER Calculation, que com base em modelos de células de Lítio é possível simular os parâmetros desejados, como demonstrado pela Figura 33.

Figura 33 – Site POWER Calculation utilizado para calcular o pack previsto neste projeto, formado pela associação 4S15P

Voltage of one battery = V

Rated capacity of one battery : Ah = Wh

C-rate : or Charge or discharge current I : A

Time of charge or discharge t (run-time) = h

Time of charge or discharge in minutes (run-time) = min

Calculation of energy stored, current and voltage for a set of batteries in series and parallel

Number of batteries in a serie = elements

Number of series in parallel = series

Total number of batteries : 60

Voltage of the storage system = volt

Current of the storage system = ampere

Capacity of the storage system (energy stored) = Ah = kWh

Fonte: Adaptado de (POWER Calculation, 2021)

Como é possível visualizar na Figura 33, são usadas células com uma tensão de 3,7V e 2,1Ah cada, este valor de capacidade por pilha se deve ao fato das pilhas serem recicladas, e por análise dos dados obtidos até aqui, pode-se constatar que a média da capacidade das pilhas obtidas via reciclagem é de aproximadamente 2100mAh. É visto que 4 pilhas associadas em série juntamente com 15 associadas em paralelo, é possível formar um banco de baterias, 4S15P, que atenda as características estipuladas para o projeto, ainda sendo possível analisar outros aspectos como a média do peso e o número de células que serão utilizadas.

Uma informação relevante sobre o projeto é que este está sendo desenvolvido para substituir uma bateria de chumbo-ácido, 12V com 60Ah, que

mesmo possuindo o dobro de capacidade, tem quase dez vezes mais peso que a de Lítio. Como a aplicação é para um veículo elétrico leve, este fator é de suma importância para a realização deste projeto.

Para realizar a separação das células, por distribuição série e paralelo, foi utilizado o site rePackr, que é destinado para a criação de bancos de baterias de Lítio, para células 18650 recicladas.

Neste site é possível adicionar os dados de capacidade de cada célula, que serão redistribuídos de forma equilibrada no banco, conforme mostrado na Figura 34. O site é apenas uma ferramenta para realizar a distribuição do banco de forma fácil, não realizando grandes contribuições. Servindo também para confirmar a capacidade do banco que foi estipulada.

Figura 34 - Site rePackr mostrando uma sugestão de ordenação das células



Fonte: Adaptado de (rePackr, 2021)

As células foram distribuídas de maneira que a capacidade individual das células agrupadas em paralelo tenham valores semelhantes na distribuição entre os 4 grupos, apresentando valores totais por associação em paralelo muito semelhantes e em torno de 30Ah cada, resultando em um banco de 14.8V e

30.256Ah. Seguindo a ordenação proposta pelo site, obtemos o seguinte arranjo, demonstrado na Figura 35.

Figura 35 - Distribuição de células de Lítio demarcadas para a construção do banco

59	60	46	4	1
20	18	54	49	2
6	68	56	94	3
27	110	74	66	4
107	79	10	39	5
64	63	57	76	6
101	112	108	92	7
13	8	1	83	8
50	78	81	19	9
103	5	90	89	10
35	84	29	95	11
36	109	96	7	12
88	28	70	111	13
2	38	37	15	14
5	102	23	106	15

Fonte: Próprio Autor

Ainda sobre o projeto, para conexão entre as células, foram escolhidas fitas de níquel, com 8mm de largura e 0.1mm de espessura, como mostrado na Figura 36.

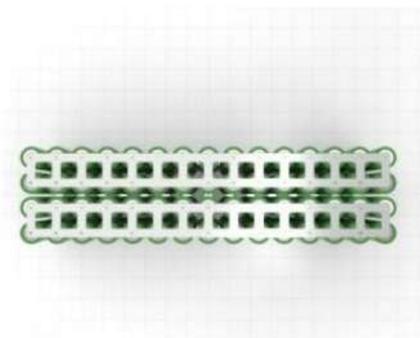
Figura 36 - Rolo de fita de Níquel com 8mm de largura e 0.1mm de espessura



Fonte: Próprio Autor

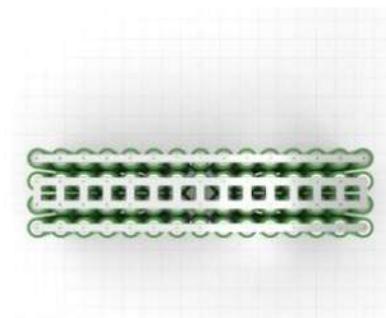
Nas Figuras 37 e 38 é possível visualizar o esquema das ligações das células de Lítio que formam um banco 4S15P.

Figura 37 - Proposta de Ligação com fitas de níquel do lado inferior do banco de baterias 4S15P



Fonte: VoltaPlex, 2021

Figura 38 - Proposta ligação com fitas de níquel do lado superior do banco de baterias 4S15P



Fonte: VoltaPlex, 2021

Para realizar a soldagem da fita de níquel, que realizará as conexões das células, será utilizado um equipamento, chamado de solda ponto, responsável por fundir o níquel a conexão positiva ou negativa da célula de bateria, modelo Suniko 788H, emprestada pela equipe Ampera Rancing da UFSC, na Figura 39.

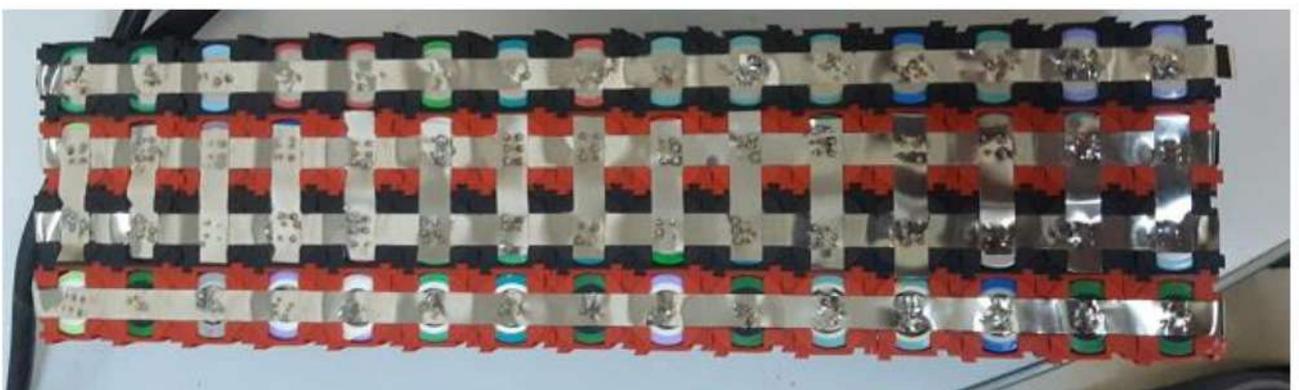
Figura 39 - Equipamento Suniko 788H, solda ponto para células cilíndricas de Lítio



Fonte: Próprio Autor

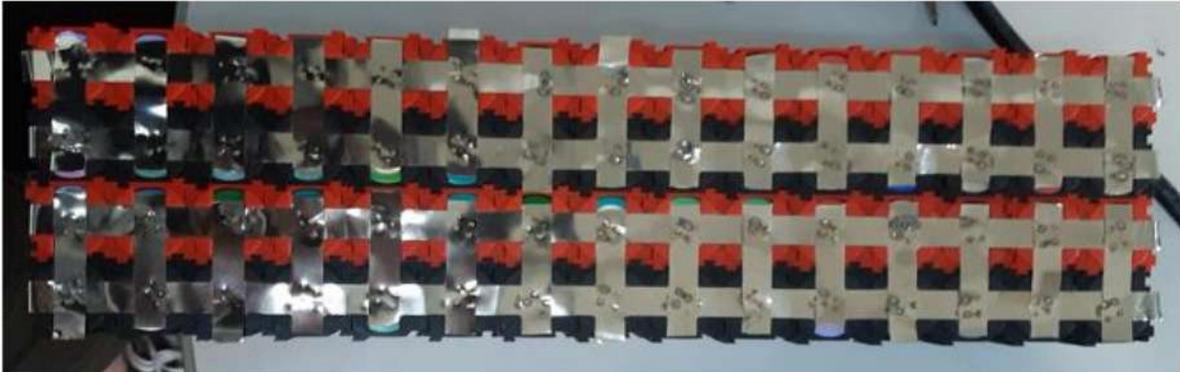
O resultado obtido pode ser observado nas Figuras 40 e 41, que mostram o banco já montado e soldado, com 30cm de comprimento, 8,5cm de largura e 65cm de altura, peso 3,7 kg.

Figura 40 - Vista superior do banco 4S15P, soldado com fitas de Níquel pela solda ponto Suniko 788H



Fonte: Próprio Autor

Figura 41 - Vista inferior do banco 4S15P, soldado com fitas de Níquel pela solda ponto Suniko 788H



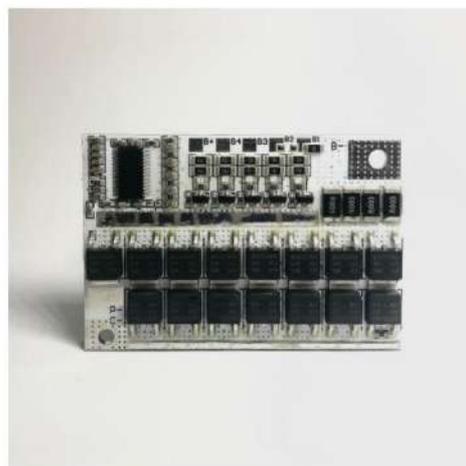
Fonte: Próprio Autor

3.4 ESCOLHA DO BMS

Para realizar o balanceamento e gerenciamento do banco de baterias será utilizado um BMS comercial, que consiga atender os parâmetros do projeto, banco de baterias de 12V e 30Ah.

O BMS escolhido, BMS 4S 14.8V 100A com balanceamento, mostrado na Figura 42, suporta uma corrente de descarga máxima de 100A e tensão máxima de até 18.1V. Este produto foi escolhido devido ao seu baixo custo e sua alta tolerância de corrente, que tem como intenção, junto com outros conjuntos de baterias, ser usado para ligar um motor CC com escovas, ME0909 com corrente nominal de 98A.

Figura 42 - BMS 4S 14.8V 100A com balanceamento que será utilizado na construção de um banco de baterias de 12V e 30Ah



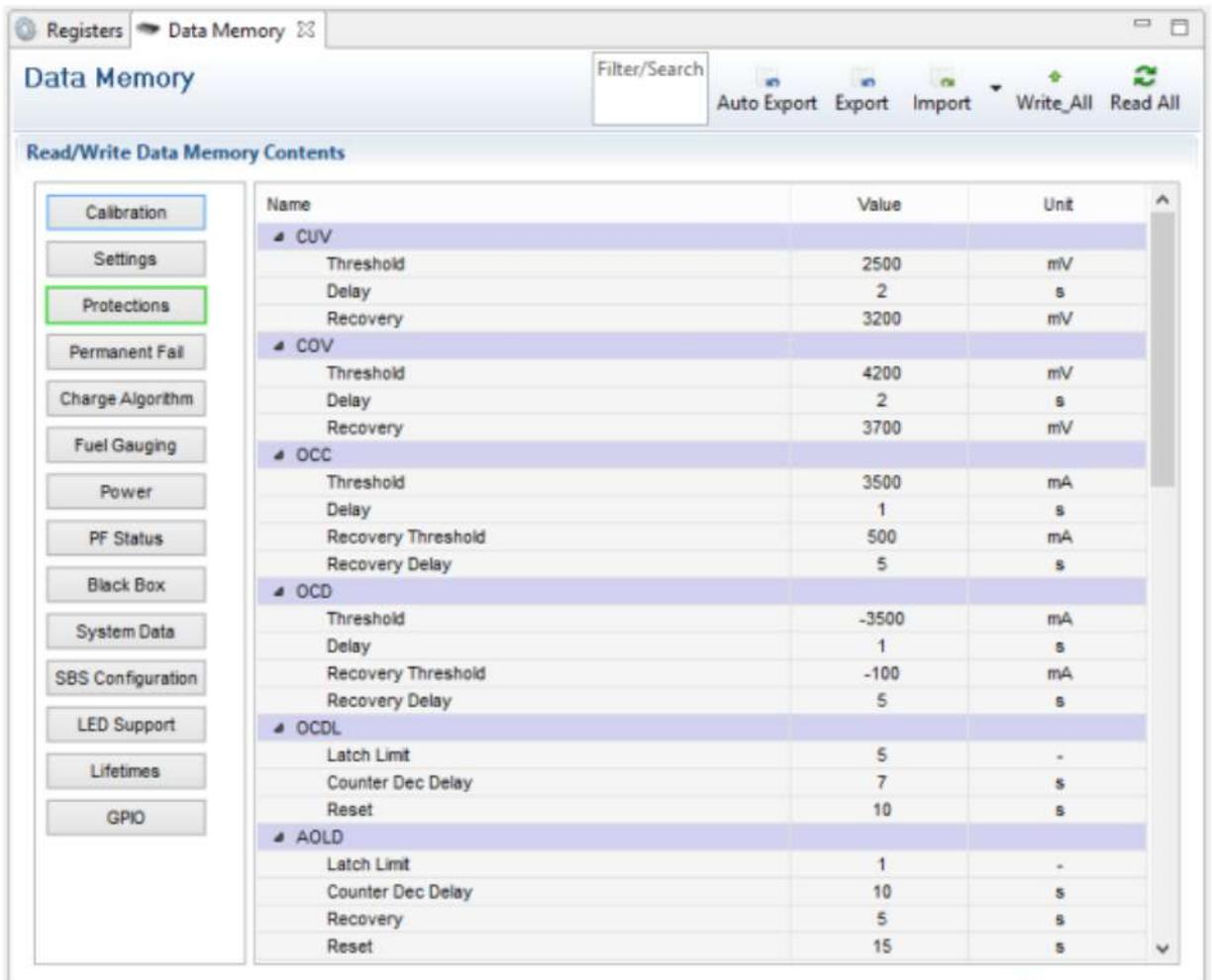
Fonte: Próprio Autor

Para a escolha do BMS foi feita uma análise dos produtos no mercado, que para a corrente necessária não apresentam grandes variações de modelos a um preço acessível, então o modelo em questão foi comprado. Entretanto é um produto que não possui nenhum tipo de regulação e que não traz consigo grandes informações, além daquelas oferecidas pelo vendedor, que serão apresentadas a seguir.

- Tensão de carregamento de 14,8 a 16,8V;
- Módulo de carga da bateria 18650;
- Placa de proteção de polímero de Lítio (3.7V);
- Tensão de proteção: 4,21 a 4,29V;
- Atraso na proteção contra sobrecarga: 1,5s a 2,5s;
- Tensão de proteção para cada bateria: 2,72 a 2,88V;
- Proteção contra sobrecarga 100A;
- Corrente de proteção para descarga excessiva 100A;
- Atraso na proteção contra descarga excessiva 0,5s a 1,5s;
- Proteção de temperatura;
- Proteção contra recuperação de escassez;
- Corrente de carga 60A;
- Balanceamento de corrente 60mA;
- Tensão de precisão: 4.14 a 4.24V;

Seria produtivo para o trabalho se houvesse um meio de usar um BMS programável, como o utilizado por (Oening, 2022) mostrado pela Figura 43. Que permite ajustar valores desejados, como para as proteções de tensão, corrente, tempo de atuação e outros, utilizando um software, que além de ser programável, faz coleta de dados.

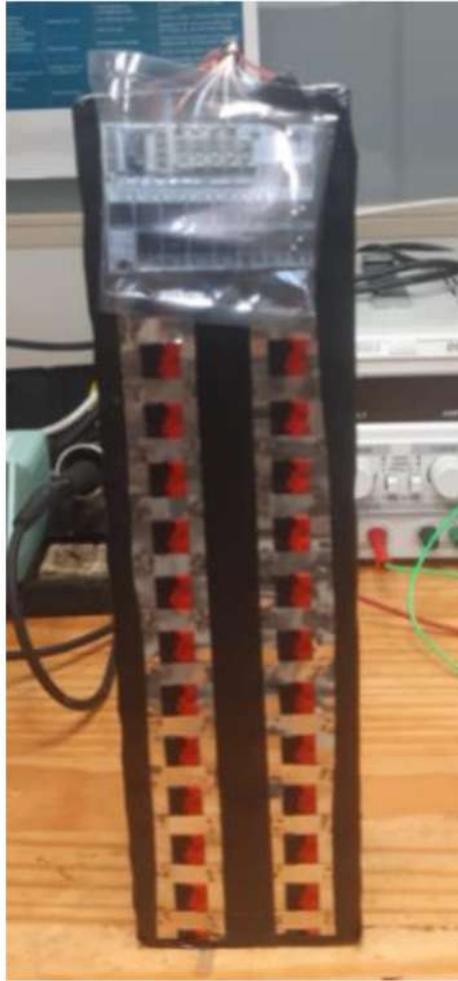
Figura 43 – Interface para programar parâmetros BMS, via bqStudio®



Fonte: (Oening, 2022)

A seguir, Figura 44, é possível visualizar o banco de baterias pronto, com o BMS utilizado devidamente instalado.

Figura 44 - Banco de baterias montado com o BMS 4S 100A instalado



Fonte: Próprio Autor

3.5 TESTES

Para determinar os parâmetros do banco de baterias, são realizados sucessivos testes de carga e descarga, com diferentes valores de taxa de carga e descarga, de maneira que se possa acompanhar e registrar valores de tensão, corrente, potência, tempo e outros, que determinam se o banco e o seu sistema de gerenciamento estão atuando corretamente com o que foi estipulado no projeto.

Para realizar as medições são utilizados um osciloscópio e um analisador de energia, para realizar a carga é utilizado fontes de bancada e para a descarga é utilizado bancos de resistores de valores variados. A captação dos dados será feita por meio do analisador de energia PA 4000 da Tektronix, que fará a coleta dos

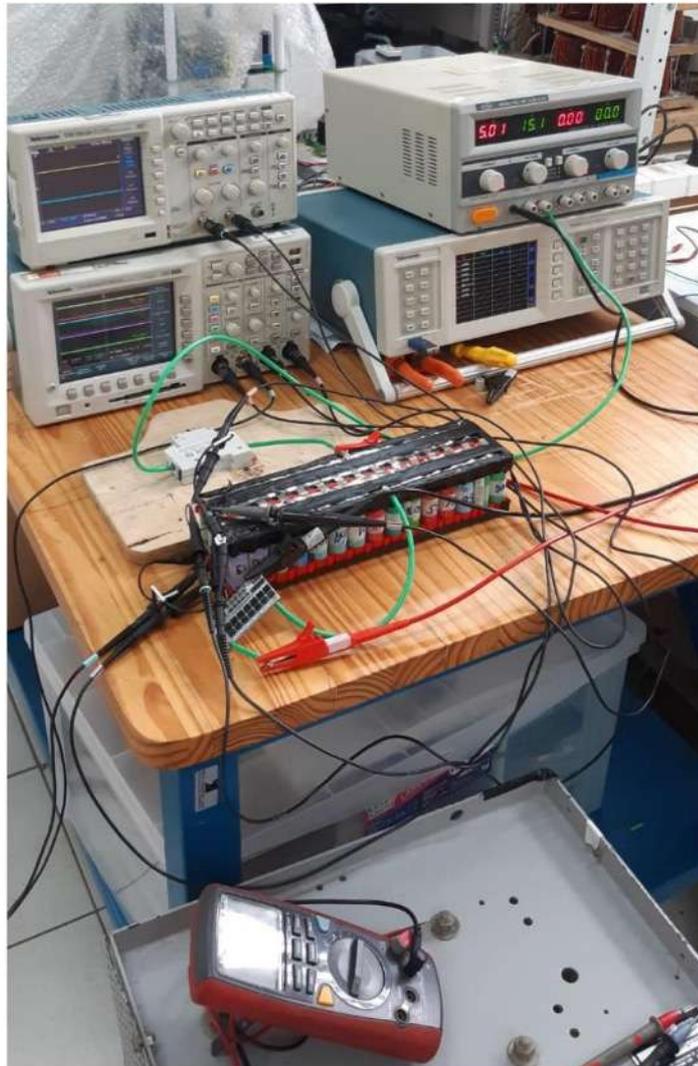
dados de tensão, corrente e potência a cada 0,5 segundos, que depois serão plotados graficamente via *software*.

Depois de cada teste é aguardado o período de 30 minutos em média para a realização de um novo teste, sendo o ciclo de descarga afetado pelo de carga.

Para o controle da temperatura será utilizada uma câmera térmica Flir modelo I7, também ventiladores sob o protótipo se preciso, com uma temperatura ambiente em torno dos 26°C, sempre tomando os devidos cuidados.

A seguir na Figura 45 é possível ver como o protótipo foi montado na bancada, com as ligações feitas e pronto para testes.

Figura 45 - Banco de Lítio posicionado para a realização dos testes, configurado para a carga

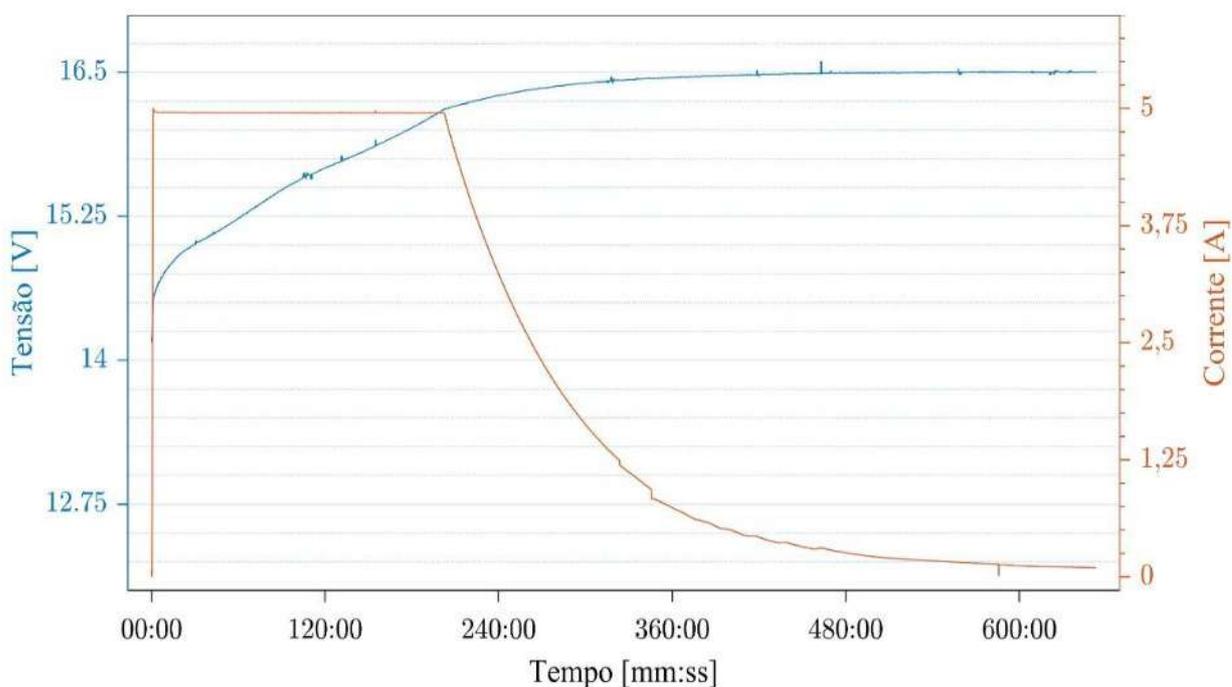


Fonte: Próprio Autor

3.5.1 Teste de carga

Como citado anteriormente para efetuar o teste de carga, primeiramente será utilizada uma fonte de bancada, modelo MPC – 3005 da marca Minimap. Ela foi configurada para 16,6V e 5A, ou seja 0.17C da bateria, para realização do primeiro teste, configurando o método CC-CV que foi apresentado na seção 2.1.4.3, Figura 14. O resultado do teste é apresentado de forma gráfica pela Figura 46, que demonstra a tensão e a corrente no banco, em função do tempo.

Figura 46 - Método CC-CV de carga com 5A (0,17C) de corrente



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 46 é possível observar o teste, que durou 9 horas e 36 minutos. O teste aconteceu como era esperado, de forma que é nítido no gráfico o modo CC e o modo CV do ciclo de carga, demonstrando uma curva típica do método CC – CV. Entretanto, devido aos ciclos de descarga não estarem tão profundos, o que será explicado na próxima seção, o valor inicial da tensão possui pouca variação em relação ao valor final de tensão.

Na Figura 47, pela tela do osciloscópio, é possível ver o valor da tensão de cada célula série ao final do teste de carga de 0,17C.

Figura 47 - Tensão das células em série após carga com 5A (0,17C)



Fonte: Próprio Autor

Pela Figura 47, é possível acompanhar o nível de tensão das células em série, de forma que a canal 1 mostra a tensão do banco inteiro, o canal 2 a soma da tensão das três primeiras pilhas, o canal 3 a soma da tensão das duas primeiras células e o canal 4 a tensão na primeira célula. Ou seja, a primeira célula está com 4,18V, a segunda com 4,12V, a terceira com 4,0V e a quarta com 4,1V, como pode ser acompanhado pela Tabela 5.

Tabela 5 – Tensões individual por célula série após teste de carga com taxa de 5A (0,17C)

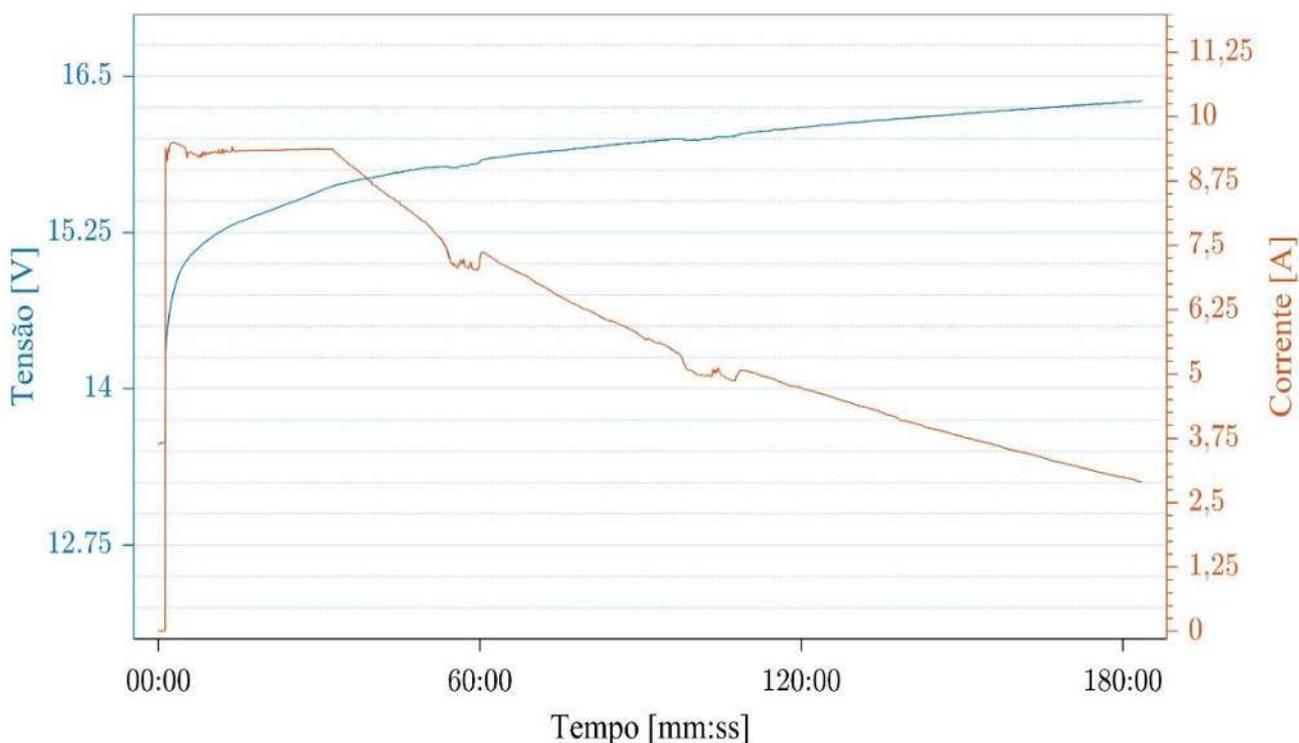
Células	Tensão (V) Individual
Célula 1	4,18
Célula 2	4,12
Célula 3	4,0
Célula 4	4,1

Fonte: Próprio Autor

A primeira célula está aparentemente sobrecarregada em relação as outras, e provavelmente provocou a proteção do BMS. A temperatura manteve-se estável entre 31°C e 32°C.

Para o segundo teste, foi utilizada a mesma fonte de bancada que para o teste anterior, só que agora configurada para 16.6V e 10A, ou seja 0,33C da bateria. O resultado obtido pode ser analisado graficamente pela Figura 48, que mostra a tensão e a corrente do banco, em função do tempo.

Figura 48 - Método CC-CV de carga com 10A (0,33C) de corrente

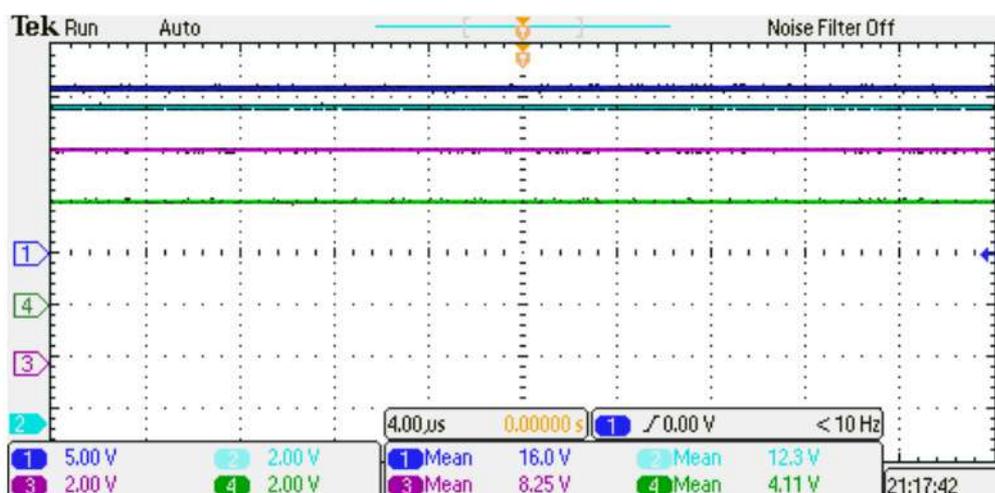


Fonte: Próprio Autor

Para este teste, antes de sua realização, a bateria foi descarregada sem o uso do BMS, para obter um ciclo de descarga mais profundo e conseguir um ciclo de carga maior, obtendo assim, o estágio CC e o estágio CV de forma clara, como é apresentado pela Figura 48.

Pela Figura 49, é possível acompanhar pela tela do osciloscópio, o valor da tensão de cada célula série ao final do teste de carga de 0,33C.

Figura 49 - Tensão das células em série após carga com 5A (0,33C)



Fonte: Próprio Autor

Pela Figura 49, de forma análoga ao primeiro teste de carga, é possível obter os valores de tensão por célula em série, que é apresentado pela Tabela 6.

Tabela 6 – Tensões individual por célula série após teste de carga com taxa de 10A (0,33C)

Células	Tensão (V) Individual
Célula 1	4.11
Célula 2	4.14
Célula 3	4.05
Célula 4	3.9

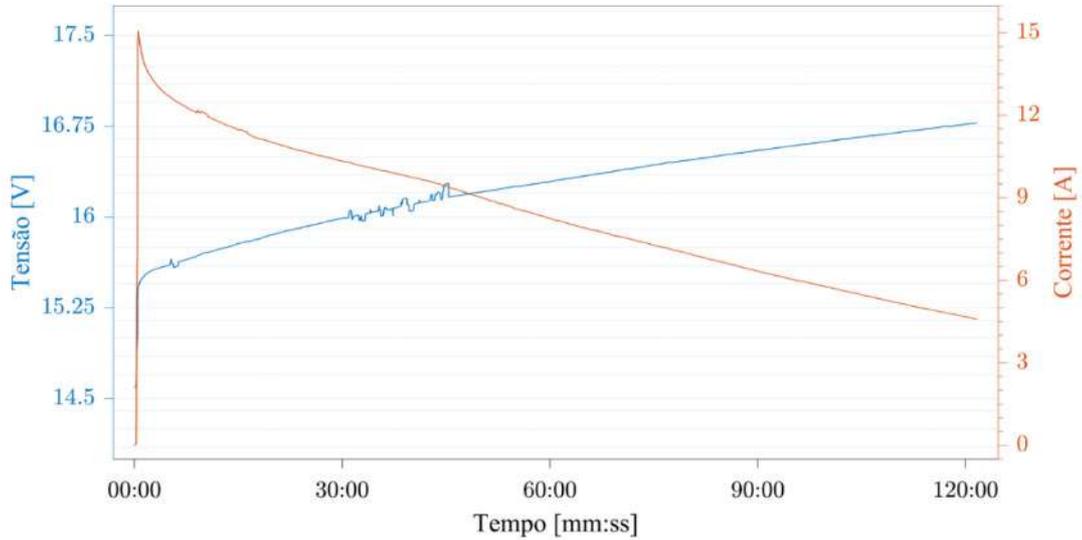
Fonte: Próprio Autor

O teste foi encerrado manualmente, após xxx tempo, não apresentando grandes variações de temperatura, que ficaram entre 33°C e 35°C

Para o terceiro teste de carga, foi utilizada uma fonte CC da marca *Supplier*, modelo FCCT 440-12,5i, configurada para 16.6V e 15A de alimentação, ou seja 0.5C da bateria. O teste é feito de forma que a tensão da fonte é setada para 16.6V, que é a tensão de carregamento sugerida pelos fabricantes de baterias de Lítio, e a corrente em 0,5C, que equivale a 15A. O resultado do teste é apresentado de

forma gráfica pela Figura 50, que demonstra a tensão e a corrente no banco, em função do tempo.

Figura 50 - Método CC-CV de carga com 15A (0,5C) de corrente

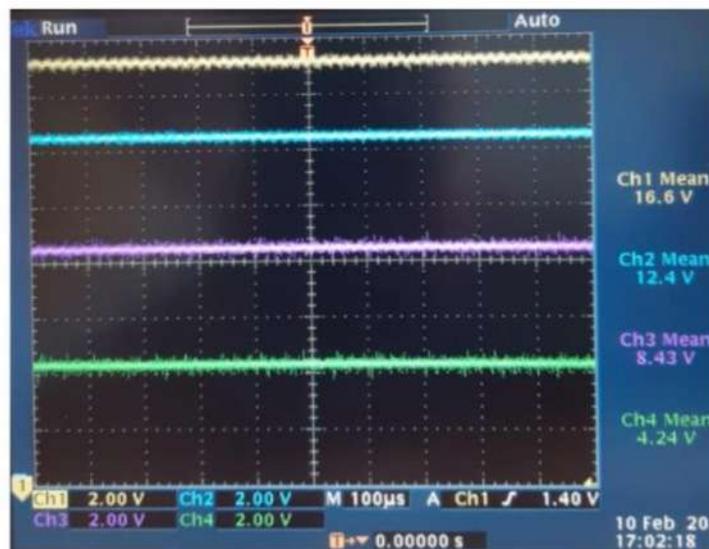


Fonte: Próprio Autor

Pela Figura 50, é possível acompanhar o teste de carga, que durou 2 horas e 1 minuto, que não aconteceu completamente como esperado, devido a pouca variação de tensão do banco, o estágio CC do ciclo de carga não aconteceu.

Na Figura 51, pela tela do osciloscópio, é possível ver o valor da tensão de cada célula série ao final do teste de carga de 0,5C.

Figura 51 - Tensão das células em série após carga com 15A (0,5C)



Fonte: Próprio Autor

Pela Figura 51, é possível acompanhar o nível de tensão das células em série, de forma de forma análoga ao teste anterior, ou seja, a primeira célula está com 4,24V, a segunda com 4.19V, a terceira com 3,97V e a quarta com 4,2V, como pode ser acompanhado pela Tabela 7.

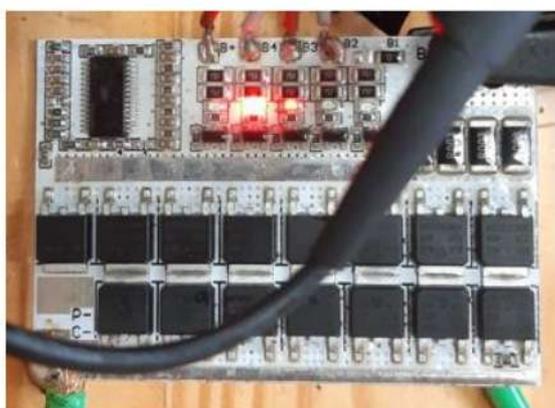
Tabela 7 – Tensões individual por célula série após teste de carga com taxa de 15A (0,5C)

Células	Tensão (V) Individual
Célula 1	4,24
Célula 2	4,19
Célula 3	3,97
Célula 4	4,2

Fonte: Próprio Autor

A primeira célula encontra-se sobrecarregada em relação as outras e provavelmente está causando a proteção do BMS, que sinalizou por um led vermelho na placa, como mostrado pela Figura 52.

Figura 52 - Sinalização do BMS para sobretensão, via led vermelho

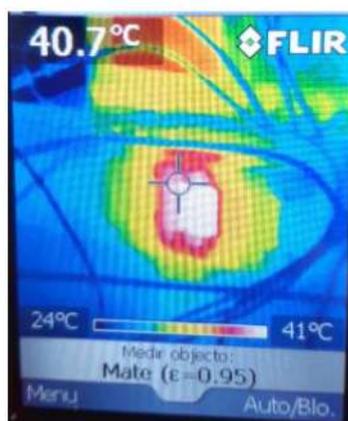


Fonte: Próprio Autor

Realizando o acompanhamento térmico do teste, pode-se verificar que o banco ficou com uma temperatura em torno de 36°C, porém foi possível notar que duas células, números 35 e 36, estavam esquentando mais que as demais, como

mostrado pela Figura 53. Estas células localizam-se na primeira fileira do banco, como pode ser visto pela Figura 35, chegando até uma temperatura de 42°C aproximadamente, algo que aconteceu perto do término de quase todos os testes de carga, mas não nos de descarga. Na Tabela 8 é possível acompanhar as informações de forma resumida.

Figura 53 – Imagem térmica do banco de baterias, focando nas células 35 e 36 com sobreaquecimento em relação as demais, em teste de carga com 0.5C



Fonte: Próprio Autor

Tabela 8 – Resultados, testes de carga

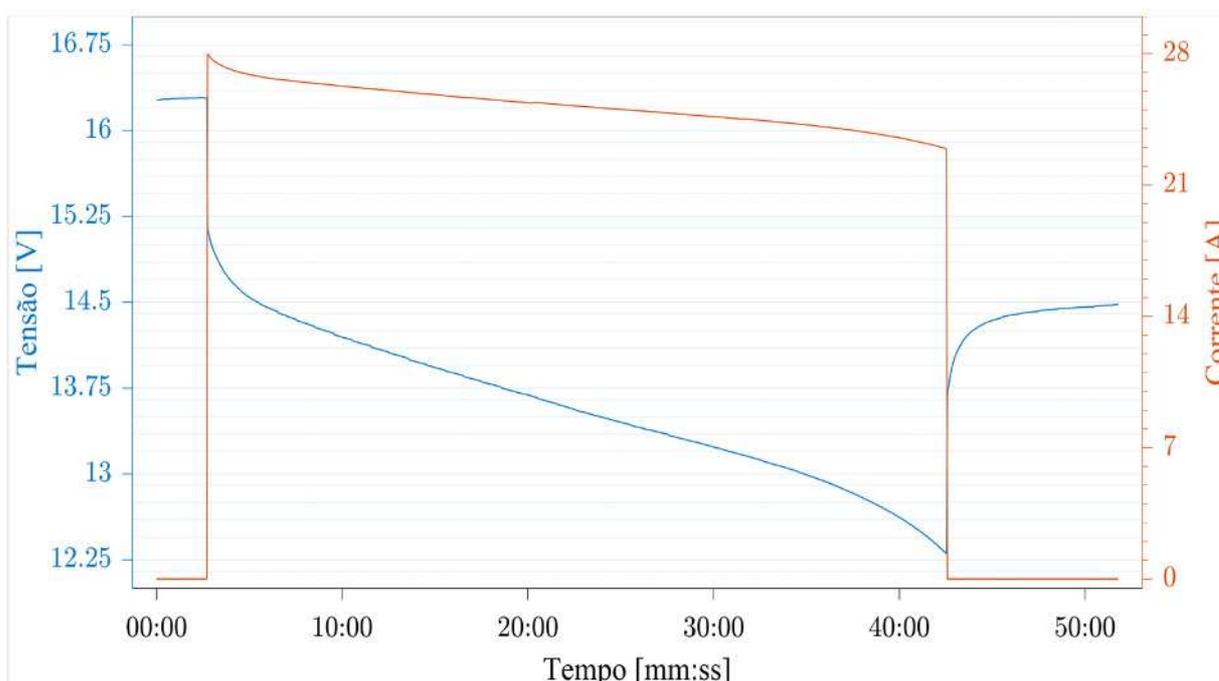
Taxa	5A (0,17C)	10A (0,33C)	15A (0,5C)
Tensão de carregamento	16.6V	16.6V	16.6V
Temperatura	31 a 32°C	33 a 35°C	35 a 37°C
Tempo	9:36h	3:03h	2:01h
Tensão Inicial	13,8V	13V	14,3V
Tensão final	16,4V	16,0V	16,6V
Proteção BMS célula(sobretensão)	4,18V (Cel.1)	-	4.24V (Cel.1)

Fonte: Próprio Autor

3.5.2 Teste de descarga

Para o teste de descarga foi utilizada uma carga com resistência constante, de três resistores de 1,6 ohms em paralelo, equivalente a 0,53 ohms aproximadamente, resultando em uma corrente de descarga próximo de 1C, 30A, da bateria, como é possível ver a seguir na Figura 54. O teste foi realizado após o ciclo de carga com 0,5C da bateria.

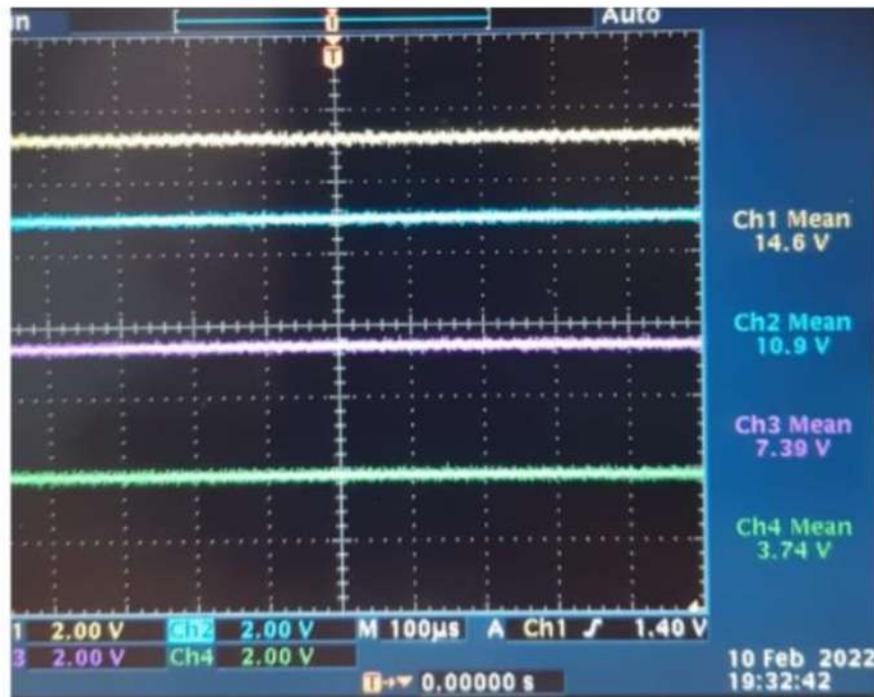
Figura 54 - Gráfico de tensão por corrente da descarga de aproximadamente 1C (30A) da bateria



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 54, é possível ver a atuação do BMS, que bloqueia o caminho de corrente de descarga quando a tensão do banco chega em uma tensão perto dos 13V, o que é algo positivo, mostrando que o BMS está atuando, mas não no nível de tensão esperada, que deveria chegar até aproximadamente 11V, 2,7V por célula em média, logo o banco não está descarregando toda a energia que deveria, sendo que o teste durou 40 minutos, da adição da carga até a atuação do BMS, totalizando uma capacidade de aproximadamente 20Ah. Na Figura 55, é possível pelo osciloscópio visualizar a tensão por célula do banco no final do teste.

Figura 55 - Tensão das células em série do banco após o teste de descarga com 30A (1C)



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 55, é possível acompanhar a tensão das células em série, análogo ao teste anterior, tensões por células, individualmente, mostrado na Tabela 9. A terceira célula encontra-se desequilibrada em relação as outras e provavelmente está causando a proteção do BMS.

Tabela 9 – Tensões individual por célula série após teste de descarga com taxa de 30A (1C)

Células	Tensão (V) Individual
Célula 1	3,74
Célula 2	3,65
Célula 3	3,51
Célula 4	3,7

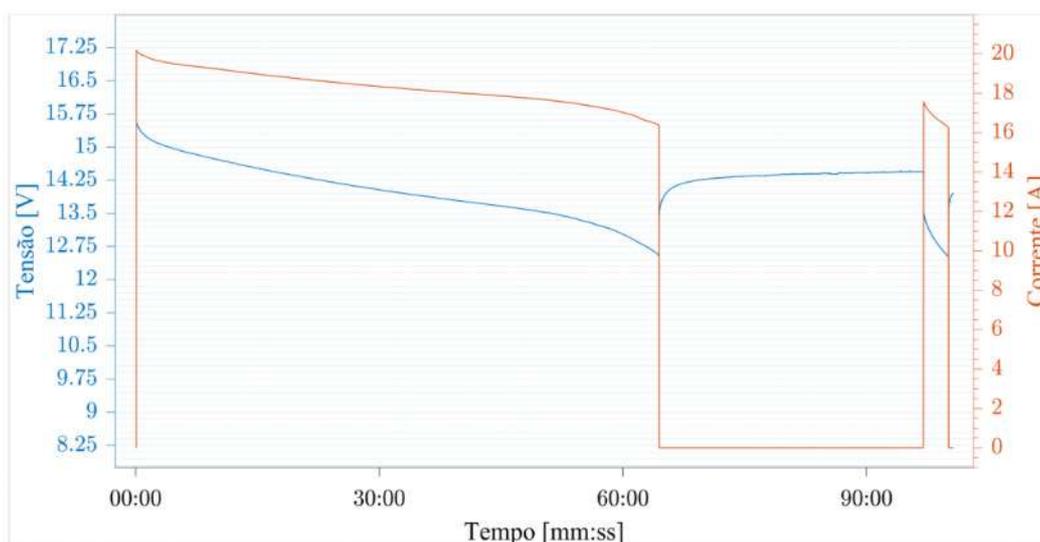
Fonte: Próprio Autor

A temperatura do banco, 20 minutos após o início do teste, era de 37°C e 35 minutos depois do início chegou a 42°C, com temperatura ambiente de 27°C.

Devido a este fato os ventiladores foram ligados no meio do processo para garantir a integridade das células.

Também foi feito um teste de descarga com uma taxa de aproximadamente 0,5C, equivalente a 15A, entretanto devido aos valores de bancos de resistores disponíveis, foi usado uma carga de aproximadamente 20A, com banco de resistores de 1,6 ohms, com dois resistores em paralelo, totalizando 0,8 ohms. Este teste foi realizado após uma carga com uma taxa de 0,5C. O teste pode ser acompanhado graficamente pela Figura 56.

Figura 56 - Gráfico de descarga, tensão por corrente em função do tempo, do banco com taxa de 20A (0,67C)



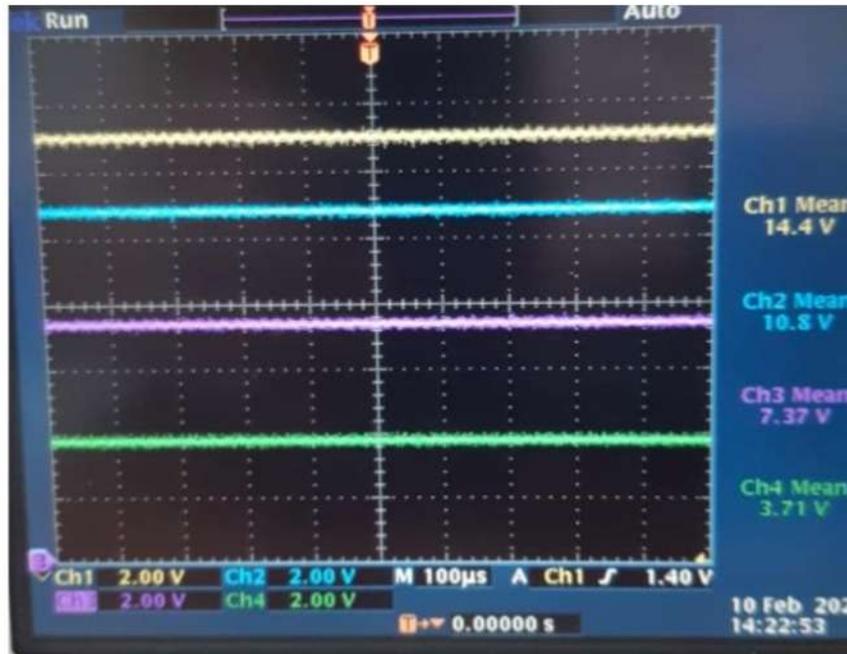
Fonte: Próprio Autor

O teste em questão durou 1 hora e 5 minutos levando em consideração apenas a primeira vez que a proteção foi ativada, resultando em uma capacidade de aproximadamente 21.6Ah, além de ter uma aparência bem peculiar aos testes de descarga na literatura, é possível acompanhar a proteção do BMS em dois momentos distintos.

Primeiramente quando a descarga está completa, mesmo que como dito antes, não se tratam de descargas completas devido a configuração do BMS que está atuando antes do desejado, mas para o dado momento, serão descargas completas, e outro momento é quando a carga é reconectada manualmente e logo depois o sistema entra em proteção novamente, o que é positivo, pois o sistema está protegendo as células, mas o banco poderia estar liberando mais energia.

Na Figura 57 é possível acompanhar pelo osciloscópio a tensão das células logo após o teste de descarga com 20A.

Figura 57 - Tensão das células em série do banco após o teste de descarga com taxa de 20A (0,67C)



Fonte: Próprio Autor

É possível obter a tensão das células em série, análogo ao anterior, mostrado individualmente pela Tabela 10.

Tabela 10 – Tensões individual por célula série após teste de descarga com taxa de 20A (0,67C)

Células	Tensão (V) Individual
Célula 1	3,71
Célula 2	3,66
Célula 3	3,43
Célula 4	3,6

Fonte: Próprio Autor

A célula de número 3 encontra-se em tensão menor em relação as outras células e provavelmente ocasionou a proteção do BMS.

A temperatura do banco manteve-se entre 35 e 36°C durante toda a duração do teste.

Os resultados gerais para os testes de descarga são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados, teste de descarga com taxa de 20A e 30A

Taxa	20A (0,67C)	30A (1C)
Carga	0,8 Ω	0,53 Ω
Temperatura	35 a 36°C	37 a 42°C
Tempo	1:05h	40 min
Tensão inicial	16,6V	16,6V
Tensão final	14,4V	14,6V
Proteção BMS célula(subtensão), após retirada da carga	3,43V(Cel.3)	3,51V(Cel.3)
Capacidade do banco	21,6Ah	20Ah

Fonte: Próprio Autor

É possível observar que a célula 3 encontra-se desbalanceada em relação as demais, sendo esta a responsável pela atuação da proteção de subtensão do BMS.

Não foi testado a proteção para sobrecorrente, devido a ser um valor muito alto, 100A, que necessitaria de equipamentos adequados.

3.5.3 Teste de carga em uma bateria comercial

A fim de comparar os resultados obtidos, serão efetuados ensaios em uma bateria de Lítio comercial, modelo LIX7L da marca Skyrich, de 12V e 22,8Wh, mostrada na Figura 58, que será carregada com uma taxa de 0,5C.

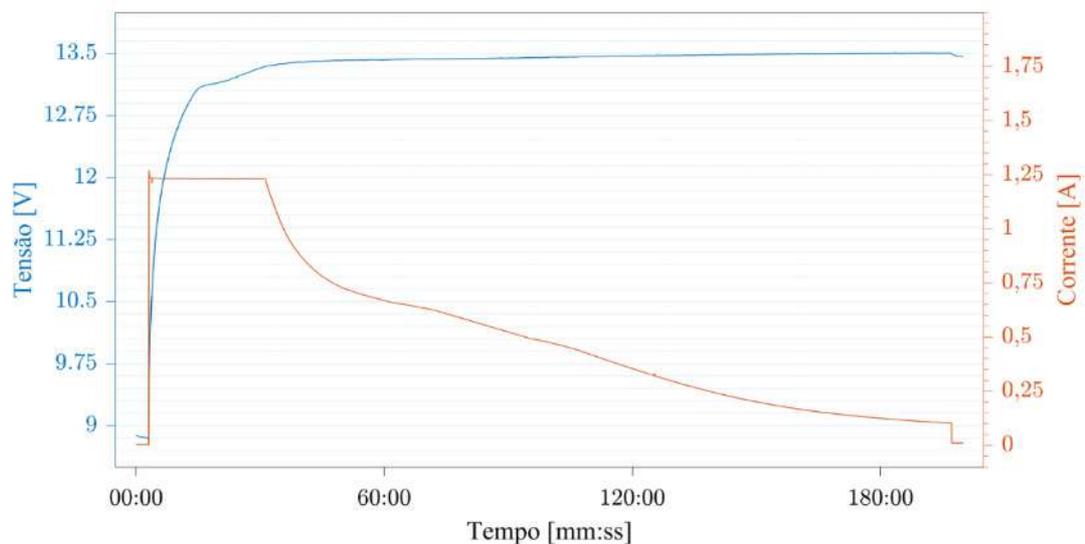
Figura 58 - Bateria de Lítio comercial 12V e 2,4Ah, marca *Skyrich*



Fonte: Próprio Autor

A bateria será carregada com o método CC-CV, com uma taxa de aproximadamente 0,5C, equivalente a 1,2Ah, o teste pode ser visto na Figura 59.

Figura 59 - Teste de carga com bateria de Lítio comercial com taxa de 1,2A (0,5C)



Fonte: Próprio Autor

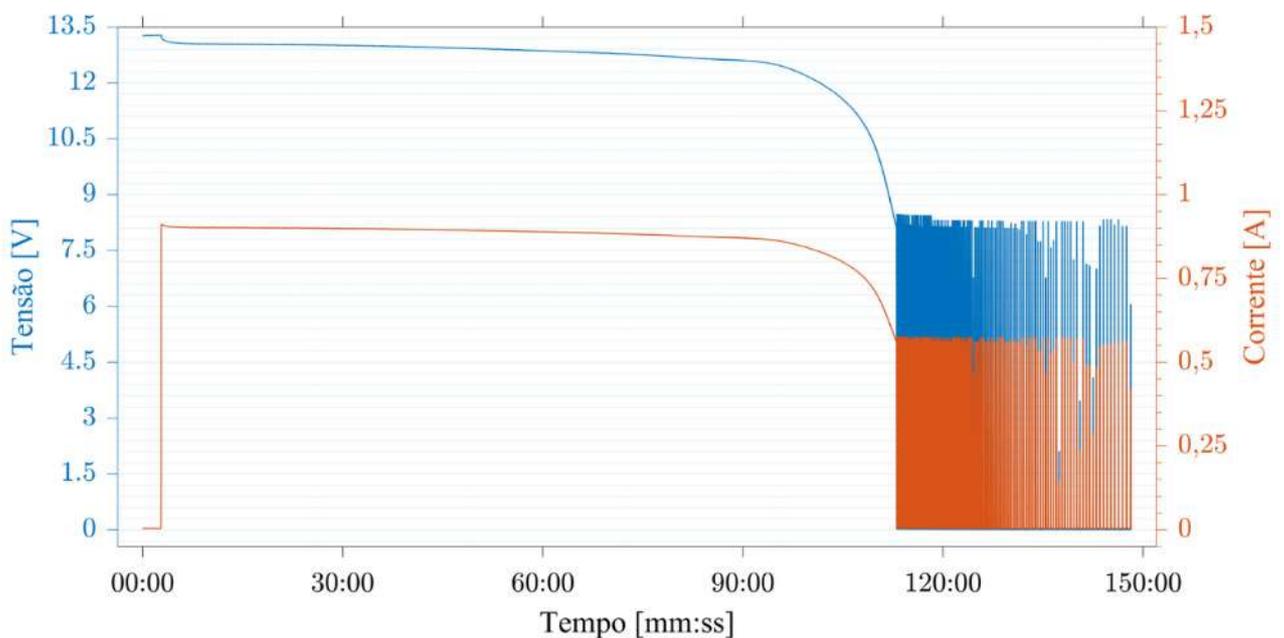
O comportamento no carregamento de ambos os bancos é semelhante, mas como a variação de tensão inicial e final no banco projetado é baixa, o estágio CC quase não é perceptível, porém as curvas têm mesmo comportamento, mesmo que se tratando de uma bateria com capacidade muito menor que a projetada.

O ensaio durou 3 horas e 17 minutos, tempo que levou para a corrente estabilizar em um valor próximo de 0A. A temperatura manteve-se constante durante todo o período, aproximadamente 28°C.

3.5.4 Teste de descarga em uma bateria comercial

Para o teste de descarga da bateria comercial de Lítio, fui usado um banco de resistores de 15 ohms, a fim de obter uma carga com taxa de aproximadamente 0,5C, equivalente a 1,2A, porém o valor utilizado neste teste, devido aos materiais disponíveis, foi de 0,9A. Na Figura 60, é possível acompanhar o ensaio de descarga.

Figura 60 - Teste de descarga com bateria de Lítio comercial com taxa de 1,2A (0,5C) aproximadamente

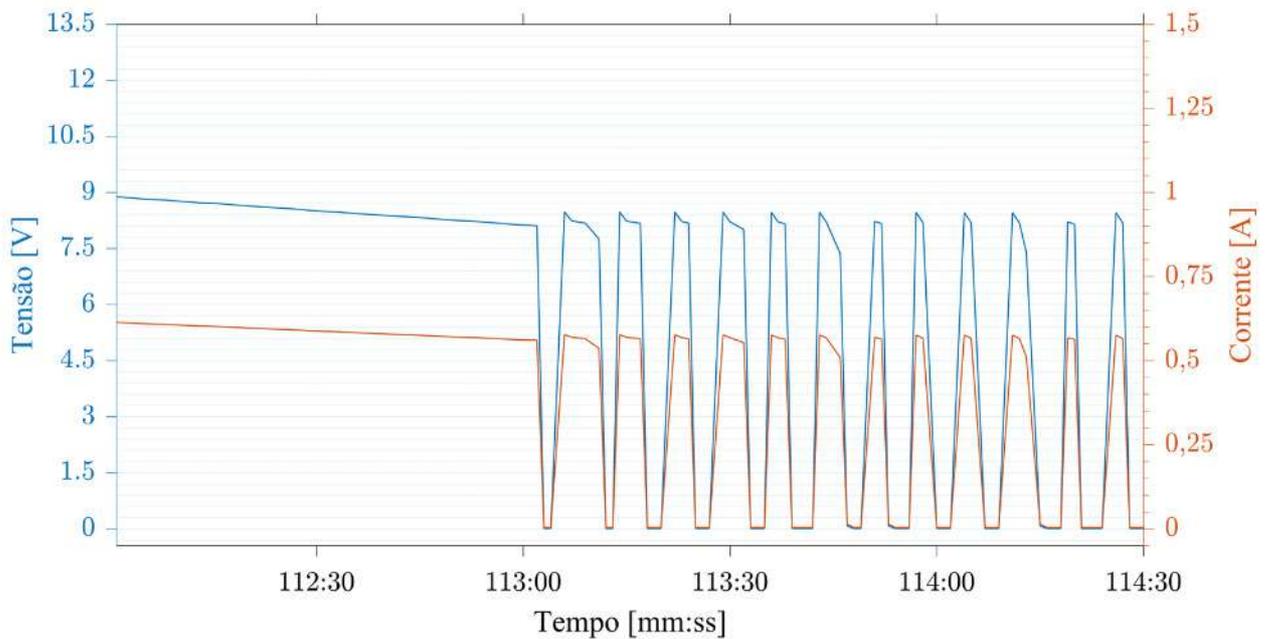


Fonte: Próprio Autor

O teste de descarga da bateria comercial assemelhou-se muito ao da bateria projetada, porém o comercial apresenta curvas mais suaves e sua proteção fica constantemente atuando, diferente do BMS utilizado no trabalho, que depois que entra em estado de proteção atua novamente se a carga for desconectada e reconectada.

Na Figura 61 é possível ver melhor a atuação do sistema de proteção da bateria comercial.

Figura 61 - Atuação da proteção de subtensão do BMS da bateria comercial LIX7L da marca Skyrich, quando descarregada com taxa de 1,2A (0,5C)



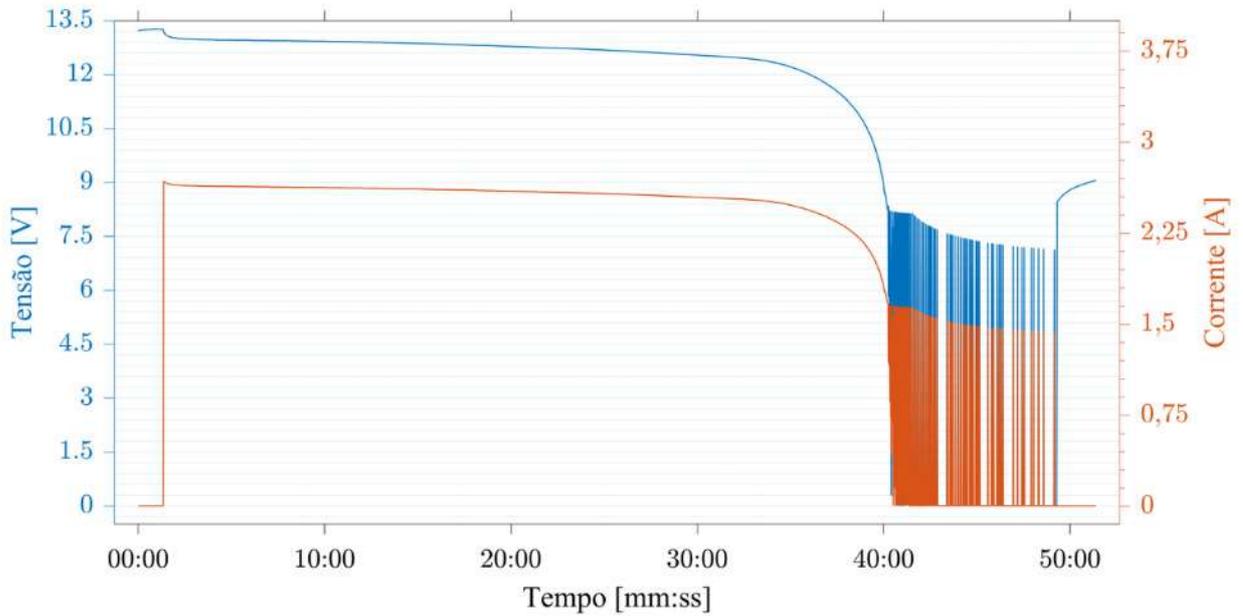
Fonte: Próprio Autor

Na Figura 61 é possível observar que a proteção de subtensão do BMS está sendo ativada e desativada, conforme a tensão sobe, devido a desacoplamento da carga, provocando um processo cíclico.

O ensaio durou 1 hora e 54 minutos, totalizando uma capacidade de aproximadamente 1,71Ah, a temperatura do banco se manteve estável, não ultrapassando 29°C.

Foi testada também a capacidade da bateria comercial para uma taxa de aproximadamente 1C, equivalente a 2,4A, no ensaio em questão foi utilizado 2,6A, que é o valor obtido através do uso de um banco de resistores de 15 ohms em paralelo com outros dois de mesmo valor, totalizando 5 ohms. O ensaio pode ser acompanhado pela Figura 62.

Figura 62 – Teste de descarga com bateria de Lítio comercial com taxa de 2,4A (1C) aproximadamente

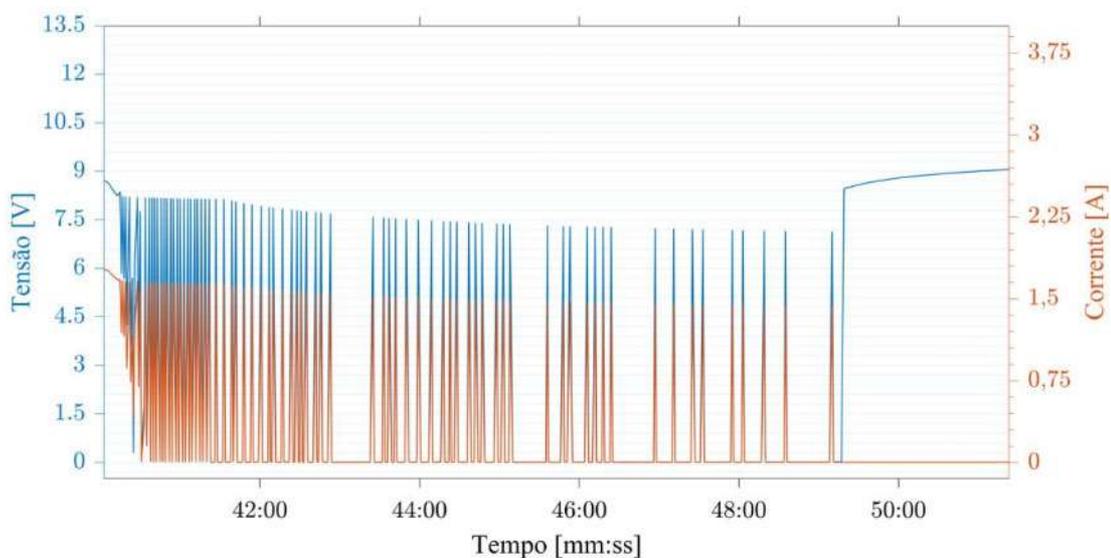


Fonte: Próprio Autor

O ensaio durou 39 minutos, resultando em uma capacidade de 1,69Ah aproximadamente, a temperatura ficou estável na faixa de 32°C.

Mais uma vez, o teste acontece de maneira esperada, tendo perfil semelhante ao do banco projetado, menos em relação a atuação da proteção do BMS, mostrado pela Figura 63, que se comporta de maneira muito distinta ao do BMS adquirido para o projeto.

Figura 63 - Atuação BMS da bateria comercial, modelo LIX7L da marca Skyrich, 2,4A (1C)



Fonte: Próprio Autor

O processo acontece da mesma forma que a proteção para a descarga de 0,5C. A bateria descarrega até chegar no ponto de atuação da proteção de subtensão do BMS, e este causa o desligamento da carga, que faz com que a tensão suba levemente, então o BMS religa a carga, a tensão desce levemente e o BMS novamente desliga a carga, processo ocorre até que a carga seja retirada, como pode ser visto pelo valor final da tensão na Figura 63, que foi quando a carga foi retirada.

Durante os testes de descarga, percebeu-se que ambos os bancos de baterias não atingiram o nível de capacidade nominal. As curvas de tensão e corrente da bateria comercial são mais suaves, mas não destoam muito das da projetada. O grande diferencial entre as duas baterias é a atuação do sistema de proteção do BMS que na bateria comercial não desliga o após entrar em proteção, entrando em um estado de liga e desliga cíclico, até que a carga seja desconectada.

A bateria comercial se comportou de forma mais adequada em relação a temperatura, sem muitas variações, mas vale ressaltar que as correntes utilizadas na bateria projetada são bem maiores e as células recicladas possuem diferentes valores de resistência, causando um aquecimento desigual sobre o banco.

4 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho propôs a construção e estudo de um banco de baterias de Lítio constituído apenas de células recicladas, supervisionadas por um sistema de monitoramento comercial, que atenda às especificações propostas. Para isso, foram realizadas várias etapas, desde análises, pesquisas, compras de materiais, testes e comparativos, que possibilitaram os resultados mostrados até aqui.

Ainda que o banco de Lítio projetado não tenha atingido a capacidade desejada no momento, devido ao que se acredita ser uma interrupção antecipada ocasionada pelo BMS no ciclo de descarga, ele provavelmente atingiria a capacidade estipulada ou até um pouco a mais se estivesse realizando a descarga completa, vale ressaltar que a bateria comercial também não chegou em seu valor de capacidade estipulado.

O banco de baterias projetado neste trabalho foi construído totalmente com baterias que foram descartadas. Com isso, tem-se dois pontos positivos: a reutilização de células e o baixo custo de implementação, uma vez que um banco de baterias equivalente, quando novo, possui um custo alto.

Considera-se que o trabalho em questão atingiu seu objetivo, demonstrando resultados típicos das baterias de Lítio, por meio de comparativo que foram apresentados ao decorrer do trabalho.

Por fim, foi possível entender melhor como atuam as baterias comerciais e seus sistemas de proteção.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, propõe-se:

(a) A troca do BMS por um novo, de preferência que possibilite ajustes dos parâmetros, como apresentado no trabalho de (Oening, 2022);

(b) A substituição das células com maior resistência e/ou baixa capacidade por outras que apresentem parâmetros melhores, especialmente as de número 35 e 36, que apresentaram problemas térmicos;

(c) Realização de mais testes com taxas de descarga maiores que 1C e construção de novos bancos de Lítio para implementar no kart do VELLE.V.;

(d) Realizar testes acompanhando a tensão das células individualmente nos processos e carga e descarga;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7S5P Battery Pack with Panasonic B Cells, 16.75Ah, 24.37A, 25.2V, Cuboid Shape, Customizable. Disponível em: <https://voltageplex.com/7s5p-25.2v-16.75ah-li-ion-18650-battery-pack-panasonic-b-cuboid>. Acesso em: 10 mar. 2022.

A123 Systems, "Cylindrical Battery Pack Design, Validation, and Assembly Guide", 2013, Disponível online em: <http://www.a123systems.com/>

BATTERY calculator for any kind of battery : lithium, Alkaline, LiPo, Li-ION, Nimh or Lead batteries. 2022. Disponível em: <https://power-calculation.com/battery-storage-calculator.php>. Acesso em: 15 fev. 2022.

BENTLEY, W. F. Cell balancing considerations for lithium-ion battery systems. In: **The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances**. Dallas, EUA: [s.n.], 1997. p. 223–226.

BERGVELD, H. J. **Battery Management Systems-Design by Modelling**. Dissertação (Mestrado) — Proefschrift Universiteit Twente, Enschede, Netherlands, 2001.

BUCHMANN, Isidor. **Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers**. Holanda: Cadex Electronics Inc, 2011.

CHENG, K. W. E.; DIVAKAR, B. P.; WU, H.; DING, K.; HO, H. F. Battery-management system (bms) and soc development for electrical vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2011. v. 60, n. 1, p. 76–88, January 2011.

D. F. Yevgen Barsukov. **Better Battery Management Through Digital Control**. Disponível em: <http://powerelectronics.com/portable-powermanagement/better-battery-management-through-digital-control>. Acesso em: 10 mar. 2022

LINDEN, David; REDDY, Thomas B.. **Handbook of Batteries**. [S. L.]: McGraw-Hill Professional, 2001.

DEVICES, Analog. **Active Battery Cell Balancing**. Disponível em: <https://www.analog.com/en/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html#>. Acesso em: 10 mar. 2022.

DNK POWER. **Lithium Polymer Battery Complete Guide**. Disponível em: <https://www.dnkpower.com/lithium-polymer-battery-guide/>. Acesso em: 10 mar. 2022.

DUARTE, B. R. A. **Desenvolvimento de um BMS para Aplicações de Mobilidade Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2013.

ENERGIZER, **NH50-2500 battery datasheet**, Disponível em: <http://www.batteriesexpert.com/media//pdfs/2021010210.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

J. MUNSON. **How to structure a battery management system. Power Supplement.** Disponível em: http://www.nxtbook.com/nxtbooks/hearst/ep0811_power/#/16. Acesso em: 10 mar. 2022.

KIM, Jonghoon; CHO, B. H.. State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System. **IEEE Transactions On Vehicular Technology**, [S.L.], v. 60, n. 9, p. 4249-4260, nov. 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2011.2168987>.

LIITOKALA. **Liitokala Lii-500 Instruction Manual.** Disponível em: <https://www.kupifonar.kz/upload/manuals/liitokala/liito-kala-lii-500-en.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

LORENCETTI, Edson João. **SISTEMA DE GERENCIAMENTO ATIVO DE EQUALIZAÇÃO DE ENERGIA EM BANCO DE BATERIAS USANDO CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL MODULAR.** 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Udesc, Joinville, 2018.

BRANDL, M.; GALL, H.; WENGER, M.; LORENTZ, V.; GIEGERICH, M.; BARONTI, F.; FANTECHI, G.; FANUCCI, L.; RONCELLA, R.; SALETTI, R.. Batteries and battery management systems for electric vehicles. **2012 Design, Automation & Test In Europe Conference & Exhibition (Date)**, [S.L.], p. 971-976, mar. 2012. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/date.2012.6176637>.

OENING, Thayna. **LITHIUM-ION BATTERY TESTS USING A DESIGNED BMS.** 2022. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Udesc, Joinville, 2022.

ORÉFICE, Giovana; CAVALCANTE, Ulisses. **A GM destruiu (quase) todos os EV1 nos anos 90, mas esse carro elétrico resistiu e foi encontrado abandonado.** 2019. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2019/12/gm-destruiu-quase-todos-os-ev1-nos-anos-90-mas-esse-carro-eletrico-resistiu-e-foi-encontrado-abandonado.ghtml>. Acesso em: 10 mar. 2022.

PANASONIC. **Lithium Batterys.** Disponível em: www.panasonic.com. Acesso em: 10 mar. 2022.

POP, V.; BERGVELD, H.; DANILOV, D.; REGTIEN, P.; NOTTEN, P. State-of-the-art of battery state-of-charge determination. In: **Battery Management Systems: Accurate Stateof-Charge Indication for Battery-Powered Application.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2008, (Philips Research Book Series). cap. 2, p. 11–45.

REPACKR. 2022. Disponível em: <https://www.repackr.com/#/pack-builder>. Acesso em: 15 fev. 2022.

REPAIR-DEAD-LAPTOP-BATTERY. Disponível em: <https://www.instructables.com/Repair-Dead-Laptop-Battery/>. Acesso em: 25 ago. 2021.

RONTEK. **NOÇÕES BÁSICAS SOBRE PACKS DE BATERIAS**. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/packs-de-baterias/packs-de-baterias-conceitos-basicos>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ROOT, M. **The TAB Battery Book: An In-Depth Guide to Construction, Design and Use**. [S.l.]: McGrawHill, 2010. 1-43 p.

SPELTINO, C; STEFANOPOULOU, A; FIENGO, G. Cell equalization in battery stacks through State Of Charge estimation polling. **Proceedings Of The 2010 American Control Conference**, [S.L.], jun. 2010. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/acc.2010.5530710>.

SCHMITT, Roberto. **ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO DE CARGA POR CORRENTE PULSADA PARA BATERIAS DE FONTES ININTERRUPTAS DE ENERGIA**. 2021. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Udesc, Joinville, 2021.

VOLTAGE Lithium-ion model. Disponível em: https://www.pvsyst.com/help/batteries_lithium_ion_model.htm. Acesso em: 10 mar. 2022.

WOLLINGER, Leonardo. **Baterias de Lítio-Íon: Um guia completo**. 2020. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/baterias-de-litio-ion-um-guia-completo/>. Acesso em: 10 mar. 2022.

LE, D.; TANG, X. Lithium-ion Battery State of Health Estimation Using Ah-V Characterization. **Annual Conference of the PHM Society**, [S. l.], v. 3, n. 1, 2011. DOI: 10.36001/phmconf.2011.v3i1.2073. Disponível em: <http://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/view/2073>. Acesso em: 10 mar. 2022.

XING, Yinjiao; MA, Eden W. M.; TSUI, Kwok L.; PECHT, Michael. Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. **Energies**, [S.L.], v. 4, n. 11, p. 1840-1857, 31 out. 2011. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en4111840>.

APÊNDICE A – LISTA DE BATERIAS TESTADAS

Pilhas(nº)	Tensão(V)	Resistência(mR)	Capacidade(mAh)	Duração(h)
1	4.2	18	2049	04:02
2	4.19	24	1682	03:19
3	4.2	50	1574	03:06
4	4.19	19	2325	04:35
5	4.21	125	1968	03:53
6	4.19	29	2240	04:25
7	4.19	50	1887	03:43
8	4.2	24	2025	04:00
9	4.2	48	570	01:07
10	4.2	31	2103	04:09
11	4.2	106	1363	02:41
12	4.19	39	1777	03:30
13	4.2	25	1991	03:56
14	4.2	100	1237	02:26
15	4.2	37	1771	03:29
16	4.2	61	1160	02:17
17	4.2	125	526	01:02
18	4.2	21	2245	04:26
19	4.2	33	1947	03:50
20	4.2	28	2386	04:42
21	4.2	125	742	01:27
22	4.2	37	166	00:19
23	4.19	22	1707	03:22
24	4.19	43	1664	03:17
25	4.19	79	1620	03:12
26	4.19	43	1554	03:04
27	4.2	29	2161	04:16
28	4.19	63	1849	03:39
29	4.19	49	1260	02:29
30	4.19	41	36	00:04
31	4.19	57	1385	02:44
32	4.2	48	913	01:48
33	4.19	125	1401	02:46
34	4.2	65	429	00:50
35	4.19	32	1863	03:40
36	4.19	30	1861	03:40
37	4.19	12	1721	03:24
38	4.19	13	1746	03:27
39	4.19	14	2108	04:09
40	4.2	125	935	01:50
41	4.2	72	1379	02:43
42	4.2	27	1486	02:56
43	4.2	27	1486	02:56
44	4.2	84	1222	02:24
45	4.2	107	1455	02:52
46	4.19	33	2409	04:45
47	4.2	40	1492	02:56
48	4.2	45	1258	02:29

49	4.2	40	2239	04:25
50	4.2	33	1928	03:48
51	4.2	123	921	01:49
52	4.19	43	375	00:44
53	4.2	31	1383	02:44
54	4.2	10	2371	04:41
55	4.2	96	1521	
56	4.2	125	2335	04:36
57	4.19	86	2085	04:07
58	4.19	125	917	01:48
59	4.19	92	2419	04:46
60	4.2	78	2443	04:49
61	4.2	55	570	01:07
62	4.2	37	1619	03:11
63	4.19	23	2046	04:02
64	4.19	28	2107	04:09
65	4.19	54	1234	02:26
66	4.2	25	2117	04:10
67	4.2	27	1865	03:41
68	4.19	27	2109	04:10
69	4.2	44	977	01:55
70	4.2	53	1755	03:28
71	4.2	21	1823	03:36
72	4.19	18	1382	02:43
73	4.2	19	1476	02:55
74	4.2	22	2120	04:11
75	4.2	111	1346	02:39
76	4.19	34	2082	04:06
77	4.2	99	1520	03:00
78	4.2	120	2003	03:57
79	4.19	125	2047	04:02
80	3.52	40	1127	02:13
81	4.2	17	2015	03:58
82	4.19	26	1538	03:02
83	4.2	125	2016	03:58
84	4.19	35	1924	03:48
85	4.19	37	1011	01:59
86	4.19	42	1295	02:33
87	4.2	23	1631	03:13
88	4.19	22	1786	03:31
89	4.2	18	1934	03:49
90	4.2	25	1844	03:38
91	4.19	45	1601	03:09
92	4.19	31	2064	04:04
93	4.19	36	2059	04:04
94	4.2	30	2130	04:12
95	4.19	50	1919	03:47
96	4.2	37	1758	03:28
97	4.2	80	1534	03:01
98	4.2	33	1163	02:17
99	4.2	54	1251	02:28
100	4.2	83	1443	02:51

101	4.19	125	1997	03:56
103	4.2	47	1868	04:07
104	4.2	75	2042	04:37
105	4.2	31	1678	03:18
106	4.2	28	1742	03:26
107	4.19	29	2136	04:13
108	4.2	29	2055	04:03
109	4.2	125	1770	03:29
110	4.2	58	2121	04:11
111	4.2	35	1787	03:31
112	4.2	27	2053	
113	4.19		2195	
114	4.2		1762	