

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

FELIPE SBERSE LUCIETTO

**METODOLOGIA PARA O REAPROVEITAMENTO DE CÉLULAS DE ÍON-
LÍTIO DE BATERIAS DE NOTEBOOK**

BENTO GONÇALVES

2023

METODOLOGIA PARA O REAPROVEITAMENTO DE CÉLULAS DE ÍON-LÍTIO DE BATERIAS DE NOTEBOOK

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Engenharia Elétrica do Campus Universitário da Região dos Vinhedos, da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para conquistar o título de Engenheiro Eletricista

Orientador:

Prof. Me. Tiago Cassol Severo

BENTO GONÇALVES

2023

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA REAPROVEITAMENTO DE CÉLULAS DE ÍON-LÍTIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Engenharia Elétrica do Campus Universitário da Região dos Vinhedos, da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para conquistar o título de Engenheiro Eletricista

Orientador:

Prof. Me. Tiago Cassol Severo

Aprovado em: ____/____/____.

Banca Examinadora

Orientador Prof. Me. Tiago Cassol Severo
Universidade de Caxias do Sul – RS

Prof. Dr. Alexandre Mesquita
Universidade de Caxias do Sul – RS

Prof. Dr. Marilda Machado Spindola
Universidade de Caxias do Sul - RS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por terem me incentivado e me dado apoio para permanecer no curso frente as dificuldades encontradas.

Ao meu orientador, professor Tiago Cassol Severo, por ter compreendido claramente meus objetivos com este trabalho e me auxiliado da melhor forma para realiza-lo.

Aos professores que muito me ensinaram ao longo desta jornada de formação acadêmica e pessoal.

Aos colegas e amigos que fiz ao longo de minha graduação, que sempre tentavam manter o entusiasmo e alegria com curso, mesmo frente as dificuldades encontradas.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um processo de ensaios voltados às células de íon-Lítio modelo 18650 encontradas em baterias de notebooks. Buscou-se analisar a viabilidade do reaproveitamento para outras aplicações. Assim, neste trabalho, foi desenvolvido um dispositivo capaz de mensurar a capacidade de fornecimento de energia de uma célula de íon-Lítio, possibilitando o ensaio em 63 células, fornecendo dados de tensão inicial e capacidade de fornecimento de corrente. Utilizando as células de melhor performance elétrica encontradas no ensaio, foi confeccionada uma bateria de 12,6V para demonstrar uma aplicação baseada nas células íon-Lítio que seriam descartadas, contribuindo de forma sustentável para minimizar os impactos dos resíduos eletrônicos no meio ambiente. Com este trabalho foi possível obter resultados que indicam a possibilidade de reaproveitamento de células oriundas de baterias de notebooks descartadas, possibilitando a criação de um *pack* de células capaz de suprir as demandas necessárias para o acionamento de cargas que drenam até 0.2C do *pack*.

Palavras-chave: Bateria de Lítio. Célula de Lítio 18650. Reciclagem de baterias de Lítio. Gestão de resíduos eletrônicos.

ABSTRACT

This work aimed to develop a testing process aimed at Lithium-Ion model 18650 cells found in notebook batteries. The idea was to analyze the feasibility of reuse for other applications. Thus, in this work, a device capable of measuring the energy supply capacity of a lithium-ion cell was developed, where it allowed the test in 63 cells, providing initial voltage data and current supply capacity. Based on the cells with the best electrical performance found in the test, a 12.6V battery was made to demonstrate an application based on Lithium-ion cells that would be discarded, contributing in a sustainable way to minimize the impacts of electronic waste on the environment. With this work, it was possible to obtain results that indicate the possibility of reusing cells from discarded notebook batteries, enabling the creation of a cell pack capable of supplying the necessary demands for activating loads that drain up to 0.2C from the pack.

Keywords: Lithium battery. 18650 Lithium Cell. Lithium battery recycling. Electronic waste management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Ragone para composição de baterias	15
Figura 2 – Fluxo de elétrons no interior de uma célula eletroquímica	17
Figura 3 – Bateria de notebook da marca Dell aberta – células 18650 da marca Samsung	20
Figura 4 – Célula modelo 18650 da marca Samsung	21
Figura 5 – Curva de carga da célula NCR 18650 – Panasonic	23
Figura 6 – Placa de carregamento para células 18650	23
Figura 7 – Gráfico do estado de conservação das células analisadas	25
Figura 8 – Baterias selecionadas	29
Figura 09 – Baterias abertas.....	30
Figura 10 – Células identificadas.....	30
Figura 11 – Dispositivo de carregamento.....	31
Figura 12 – Diagrama de ligação dos componentes.....	32
Figura 13 – Circuito montado.....	34
Figura 14 – Resultados dos ensaios de capacidade.....	36
Figura 15 – Bateria montada.....	38
Figura 16 –Curvas de descarga.....	39
Figura 17 – Curva de descarga média da bateria confeccionada.....	39
Figura 18 – Curva de descarga de uma célula em diferentes cargas.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições dos diferentes tipos de células 18650.....	22
Tabela 2 – Resultados dos ensaios	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

mAh	Milliampère-hora
V	Volts
Wh	Watt-hora
Ah	Ampère-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL.....	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3	ESCOPO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	MERCADO MUNDIAL DE BATERIAS DE NOTEBOOK.....	14
2.2	BATERIAS ELETROQUÍMICAS.....	14
2.2.1	DEFINIÇÕES SOBRE BATERIAS ELETROQUÍMICAS.....	16
2.2.2	PARÂMETROS ELÉTRICOS RELEVANTES PARA CÉLULAS E BATERIAS ELETROQUÍMICAS.....	17
2.2.3	MODELOS DE BATERIAS ELETROQUÍMICAS.....	19
2.2.3.1	BATERIAS DE ÍON-LÍTIO.....	19
2.2.3.2	CÉLULAS DE ÍON-LÍTIO MODELO 18650.....	21
2.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	COLETA DO MATERIAL PARA ENSAIO E DESCRIÇÃO.....	26
3.2	SEPARAÇÃO DAS CÉLULAS PARA O PROCESSO DE TESTAGEM.....	26
3.3	PERÍODO DE REPOUSO E PRIMEIRA MEDIÇÃO.....	27
3.4	CARREGAMENTO DAS CÉLULAS.....	27
3.5	TESTE DE DESCARGA DAS CÉLULAS.....	27
3.6	DEFININDO APLICAÇÕES.....	28
4	RESULTADOS.....	29
4.1	SELEÇÃO DAS BATERIAS PARA O ENSAIO.....	29

4.2	ABERTURA DAS BATERIAS E SEPARAÇÃO DAS CÉLULAS.....	29
4.3	PERÍODO DE REPOUSO E MEDIÇÃO.....	31
4.4	CARREGAMENTO DAS CÉLULAS.....	31
4.5	TESTE DE DESCARGA DAS CÉLULAS.....	32
4.5.1	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA O MICROCONTROLADOR.....	34
4.6	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESCARGA.....	34
4.7	CONFECÇÃO DE UMA BATERIA DE ÍON-LÍTIO COM AS CÉLULAS ENSAIADAS.....	37
4.7.1	TESTE DE AUTONOMIA DA BATERIA.....	38
5	CONCLUSÕES.....	41
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
	APÊNDICE A	46

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos eletrônicos representam um crescente problema na sociedade e sua gestão traz novos desafios a cada dia. O trabalho de Gunter investiga os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de pilhas e baterias, mencionando que as bateria de íon-lítio deveriam ser coletadas e tratadas adequadamente, apesar de a legislação brasileira ainda não exigir.

Além disso, segundo a (Strategy Analytics, 2022), um setor que se encontra em alta no momento é o de notebooks, movido pelas novas tendências mundiais que promovem o chamado *home office*, isto é, trabalho em casa, onde empresas permitem que os colaboradores executem uma série de atividades, comumente administrativas, das próprias residências, fornecendo geralmente notebooks para que as pessoas possam realizar as funções profissionais.

De acordo com a fabricante de notebooks Dell, a vida útil de uma bateria de notebook varia entre três e cinco anos, após esse período ela é descartada no lixo eletrônico. Com o atual crescimento do segmento de informática somado ao crescente modelo de *home office*, acredita-se que cada vez mais resíduos serão gerados. Entretanto não existe um controle nacional mais intenso sobre o descarte deste material.

Ao mesmo tempo, cada vez mais se faz necessário o uso de fontes portáteis de energia, seja na composição de veículos elétricos ou na construção de sistemas que não possuem conexão direta com a rede elétrica, como radares de velocidade nas rodovias, parquímetros nas cidades e estações meteorológicas no campo. Levando isso em consideração, o estudo da viabilidade da reutilização de parte desse material e como reinseri-lo no mercado na forma de novas baterias e outras aplicações justifica o trabalho.

Assim, com o intuito de analisar a viabilidade de reutilizar baterias descartadas de notebook para outras aplicações, este trabalho irá propor uma metodologia de ensaio que irá avaliar a qualidade do material descartado e possível reutilização para outras áreas relacionadas ao armazenamento de energia.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um método de testagem de células de íon-lítio, modelo 18650, para o reaproveitamento em sistemas de *off-grid* de iluminação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as células retiradas das baterias para controle da capacidade após os testes;
- Criar uma planilha para as células etiquetadas;
- Testar a capacidade de fornecimento de energia das células de íon-lítio 18650 recicladas;
- Confeccionar uma bateria com as células de maior capacidade ensaiadas para uma aplicação voltada a iluminação.

1.3 ESCOPO

Neste trabalho foram coletadas 10 baterias de notebook usadas, de modelos diferentes para retirada das células de íon-lítio, mediante a desmontagem. A partir disso, todas as células foram catalogadas e analisadas individualmente por uma metodologia de testes apresentada neste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o intuito de fundamentar a metodologia a ser aplicada, são apresentados os conceitos teóricos e práticos para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

2.1 MERCADO MUNDIAL DE BATERIAS DE NOTEBOOK

Atualmente, o mercado de bens tecnológicos apresenta crescimento considerável no Brasil. Apenas no primeiro trimestre de 2021 com as modalidades de trabalho remoto e híbrido oriundos da pandemia, a demanda por notebooks teve um crescimento estimado de 81% ao ano, totalizando 68,2 milhões de unidades vendidas de acordo com o relatório da (Strategy Analytics, 2022). Esse crescimento se concretizou apesar da escassez de suprimentos eletrônicos para a manufatura dos produtos, o que demonstra uma demanda reprimida por este tipo de produto.

Conforme o fabricante de notebooks Dell, a vida útil de uma bateria de notebook varia entre 3 e 5 anos. Assim, levando em conta essa premissa, pode-se supor que a quantidade de notebooks vendidos até o mês de março de 2021 terão que ter baterias trocadas até o início de 2026, gerando um volume significativo de resíduos oriundos desta substituição que, sem o destino apropriado, poderá prejudicar o meio ambiente como um todo, acarretando em danos ao meio ambiente.

Como esse mercado tende a se manter nesse ritmo de consumo, ao ano será descartado, aproximadamente, 273 milhões de baterias, que totalizam 68 toneladas de resíduos que possuem na composição células de Íon-Lítio, onde precisarão de um destino apropriado para a sustentabilidade do planeta.

2.2 BATERIAS ELETROQUÍMICAS

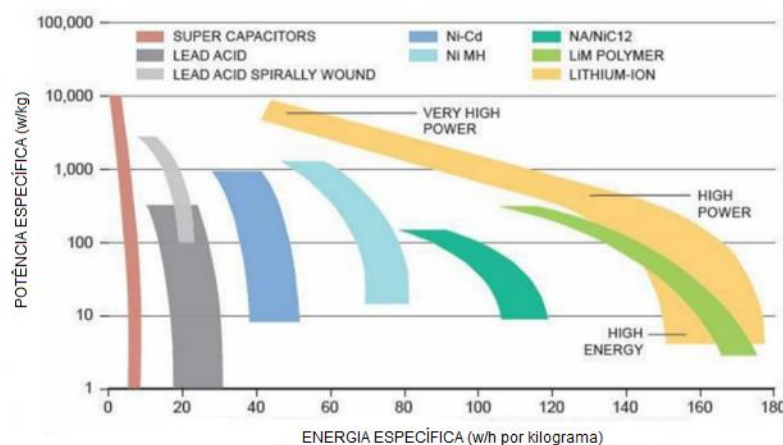
De acordo com (Parfomak, 2012), uma bateria ou célula eletroquímica é um dispositivo que converte a energia química contida em materiais ativos diretamente em energia elétrica através de reações químicas de oxirredução. Este processo envolve a liberação de elétrons que partem do ânodo e seguem por um condutor passando por uma carga até chegar ao cátodo, onde ocorre a redução. Para completar o circuito elétrico, o interior da célula é preenchido com um eletrólito, que varia de acordo com o modelo e composição da bateria, então, com a soma desses elementos, a corrente elétrica flui de forma contínua em malha fechada por todo o circuito.

A unidade eletroquímica básica é denominada de célula, onde pode ser conectada com outras células semelhantes para formar uma bateria, que dependendo da associação somam corrente ou tensão, para atingir um parâmetro específico para uma determinada aplicação.

Existem diversos tipos de baterias, com várias composições e diferentes aplicações. De modo geral o que se busca é uma bateria com a melhor relação peso-energia, esta informação colabora no desenvolvimento de projetos que utilizem este tipo de acumulador de energia. Assim, uma maneira de visualizar esta relação é por meio do diagrama de Ragone, onde é possível analisar os valores de potência específica (W/kg) e energia específica (Wh/kg) de diversos modelos de bateria.

A figura 1 apresenta um diagrama de Ragone de algumas tecnologias empregadas na construção de baterias. É possível observar que os modelos em que o material Lítio é empregado na composição possuem maior densidade energética em relação as demais. Então, para uma mesma massa, as baterias de Lítio irão fornecerão mais energia em comparação aos demais modelos.

Figura 1 - Diagrama de Ragone para composição de baterias



Fonte: Adaptado da Johnsons controls.

2.2.1 DEFINIÇÕES SOBRE BATERIAS ELETROQUÍMICAS

Segundo (Bagotsky, 2015), que está de acordo com (Parfomak, 2012), uma célula galvânica é uma unidade eletroquímica simples composta por dois

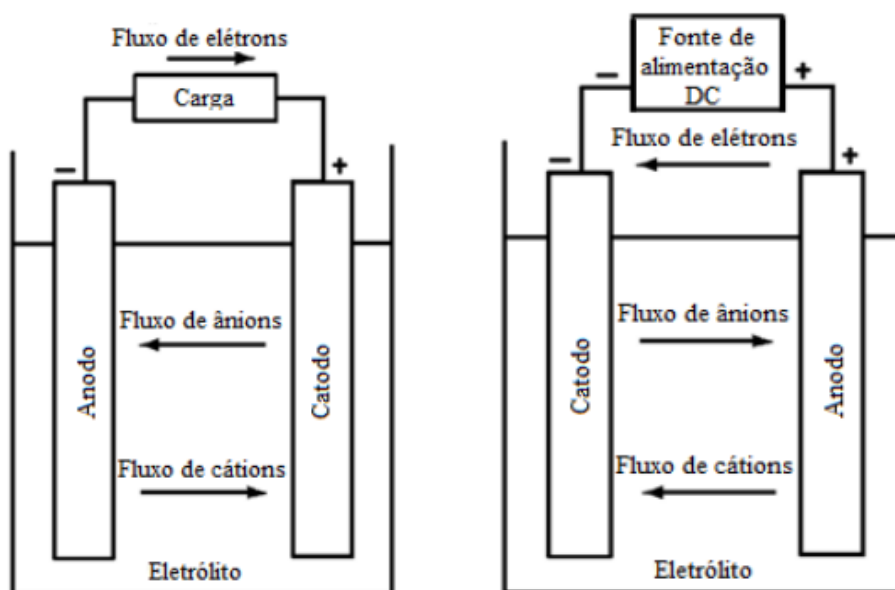
eletrodos, um cátion e um ânion, que estão imersos em um eletrólito. Quando uma carga é conectada aos terminais dos eletrodos, uma corrente elétrica contínua flui do ânodo para o cátodo, formando um circuito elétrico. Neste processo o ânodo é oxidado durante a reação eletroquímica e fornece elétrons a carga conectada a célula, ao passo que o cátodo recebe estes elétrons do circuito externo e é reduzido no processo eletroquímico de oxirredução.

Enquanto isso, o eletrólito, que geralmente é um líquido ou uma pasta, fica responsável por transferir os íons dentro da célula, que segundo (Linden, 2002) são adicionados sais, ácidos ou bases ao eletrólito com o intuito de proporcionar a condutividade iônica entre ânodo e cátodo.

Na figura 2 é possível observar uma representação do fluxo de elétrons da célula através de uma carga conectada a ela. Neste processo há a formação dos íons positivos, cátions e dos íons negativos, ânions.

Algumas células são passíveis de serem recarregadas, como ocorrem com as células de íon-Lítio. Na figura 2 é possível observar que o fluxo de corrente é invertido, onde o cátodo passa para a polaridade negativa e o ânodo passa a ter polaridade positiva. Desta forma, a célula passa a receber elétrons da fonte ao invés de fornecer elétrons à carga.

Figura 2 - Fluxo de elétrons no interior de uma célula eletroquímica



Fonte: Adaptado de LINDEN, David e REDDY, Thomas (2002).

2.2.2 PARÂMETROS ELÉTRICOS RELEVANTES PARA CÉLULAS E BATERIAS ELETROQUÍMICAS.

Uma bateria é um conjunto de células associadas em série ou em paralelo e uma célula a unidade básica de fornecimento de energia. Partindo desse pressuposto, algumas características elétricas apresentadas a seguir, intrínsecas a uma bateria, serão ao mesmo tempo, as mesmas que as intrínsecas a uma célula, destacando-se:

- Capacidade da célula: Expressa normalmente em miliamperes-hora (mAh), é a capacidade que uma célula possui de armazenar energia elétrica. Este valor é obtido por meio de um cálculo integral da corrente de descarga, ao longo de um período. Isso significa que se uma célula é capaz fornecer 500 mA a uma carga por um período de 4 horas, em teoria, ela possui uma capacidade de 2000 mAh ou 2 Ah. (Rand e Moseley, 2004).
- Tensão máxima: É o maior potencial elétrico que uma célula pode receber no processo de carga. Uma célula típica de íon-Lítio, como o modelo 18650 de qualquer fabricante, tem a tensão máxima fixada em 4,2 V, que é fornecido a célula ao final do processo de carga.
- Tensão nominal: É o valor médio de operação de uma célula, normalmente este valor fica entre a tensão mínima e a tensão máxima de funcionamento da própria célula. Este valor pode variar de acordo com o fabricante e com a carga conectada a célula.
- Tensão de corte: É a menor tensão que uma célula pode operar de forma segura, ou seja, sem prejudicar as propriedades internas. Em células de íon-lítio modelo 18650, este valor varia de 2,6 V até 2,8 V, de acordo com o fabricante. Este valor é sempre obtido junto a folha de dados técnicos (*datasheet*) de cada fabricante.

- Taxa de carga e descarga: É a razão entre a capacidade máxima de carga ou descarga de uma célula o tempo em que a ação ocorre. Este valor é expresso em mAh, por se tratar de uma corrente elétrica ao longo do tempo.
- Profundidade de descarga: Está diretamente relacionado com a vida útil de uma célula. Este valor é o percentual de energia que está sendo drenado da célula frente a capacidade nominal. Quanto menor for a taxa de consumo de energia ao longo dos ciclos, maior será a vida útil de uma célula
- Resistência interna: É resistência elétrica intrínseca a célula, ou seja, a dificuldade que a corrente elétrica encontra para circular o circuito interno da célula. Vários fatores influenciam na resistência interna, como tempo de uso, temperatura de operação e principalmente profundidade de descarga, que leva ao extremo o material ativo presente dentro da célula e acaba aumentando este valor.
- Vida útil: A duração da bateria, tempo de vida, ou vida útil, é o tempo em que a capacidade efetiva da bateria atinge 80% de capacidade nominal (NBR 15254, 2005). Vários fatores influenciam na diminuição da vida útil de uma bateria, como por exemplo: Descargas longas e profundas, isto é, acima do recomendado pelo fabricante, operação em condições extremas de temperatura e, em alguns modelos de baterias, descargas parciais das baterias.

2.2.3 MODELOS DE BATERIAS ELETROQUÍMICAS

As baterias eletroquímicas podem ser separadas em dois grupos, primárias e secundárias. As baterias primárias têm a característica de não serem recarregáveis, ao passo que as secundárias são recarregáveis.

No grupo das baterias secundárias, recarregáveis, um modelo empregado com frequência é a bateria de chumbo-ácido (Pb-ácido) em função do custo-benefício. Em relação ao desempenho, existem baterias com performances melhores no mercado, como as de íon-lítio (Li-íon) e as de níquel-cádmio (Ni-Cd) (Pinho, 2014). Entretanto, devido ao custo envolvido na manufatura destas baterias, elas são restritas a alguns segmentos, podendo-se destacar a indústria informática, no setor de notebooks, onde as baterias de íon-Lítio dominam integralmente este segmento.

2.2.3.1 BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

O elemento químico lítio (Li) possui alta densidade energética, ou seja, para uma mesma massa consegue disponibilizar mais energia (Wh) em relação a outros elementos presentes nas outras baterias, o que torna esta tecnologia promissora no quesito eficiência energética de baterias. O Lítio apresenta alta eletropositividade e baixo número atômico, características que segundo (Schögl, 2013) favorecem a construção de uma bateria com tensão elétrica maior por célula e baixo peso e volume.

Uma bateria de notebook, conforme apresentado na figura 3, é composta basicamente por algumas células de íon-lítio 18650, que são associadas em série e paralelo de forma a atingir os parâmetros de tensão e corrente desejados para determinada aplicação, além de uma placa controladora de carga, (BMS), que tem a função de gerenciar os fluxos de eletricidade no conjunto das células. Segundo (Linden e Reddy, 2002) uma destas células é composta basicamente de compostos de Lítio (positivo) intercalados com compostos negativos, normalmente grafite. O terminal positivo da célula está em contato com um eletrodo composto por óxido de Lítio-Cobalto (LiCoO_2) ou óxido de Lítio-Manganês (LiMn_2O_4), ao passo que o terminal negativo está conectado a um eletrodo de Carbono ou grafite. No que diz respeito ao eletrólito o mais utilizado é o hexafluorofosfato de Lítio (LiPF_6) que possui uma alta condutividade iônica.

Figura 3 - Bateria de notebook da marca Dell aberta – células 18650 da marca Samsung



Fonte: O autor (2022).

De acordo com (Pinho, 2014), podem-se destacar como as principais vantagens na utilização de baterias de íon-Lítio as seguintes características:

- Rápida capacidade carga, em relação as demais;
- Baixa taxa de autodescarga, em virtude da resistência interna;
- Longo ciclo de vida útil, aceitam várias cargas e descargas
- Faixa de operação em diversas temperaturas;
- Não necessita manutenção interna nem acréscimo de fluídos uma vez que as células são seladas.

2.2.3.2 CÉLULAS DE ÍON-LÍTIO MODELO 18650

Atualmente uma das maiores aplicações das células de íon-Lítio modelo 18650, conforme apresentado na figura 4, são na fabricação das baterias de notebook, onde em geral utilizam 3, 4, 6, 9 ou 12 células, de acordo com os modelos e marcas dos computadores.

Estas células são cilíndricas, possuindo 18 milímetros de diâmetro e 65 milímetros de comprimento. Este formato favorece a resistência mecânica da célula, uma vez que as forças externas e pressão interna tendem a se distribuir no entorno do invólucro, além de facilitar os métodos de produção.

Figura 4 - Célula modelo 18650 da marca Samsung



Fonte: Samsung (2020).

Diferentes nomenclaturas podem ser encontradas no corpo das células 18650, em geral as nomenclaturas são compostas pelo nome do fabricante, composição dos elementos ativos da célula e capacidade de descarga. A seguir, na tabela 1, é possível observar as diferentes composições das células e as respectivas abreviações.

Tabela 1 - Composições dos diferentes tipos de células 18650

Composição Química	Nomenclatura Química	Sigla expressa no corpo da célula
Oxido de lítio manganês	LiMn_2O_4	IMR
Lítio níquel manganês	LiNiMnCoO_2	INR
Óxido de lítio níquel cobalto alumínio	LiNiCoAlO_2	NCA
Óxido de lítio níquel cobalto	LiNiCoO_2	NCO
Óxido de Lítio cobalto	LiCoO_2	ICR
Fosfato de lítio ferro	LiFePO_4	IFR

Fonte: O próprio autor (2022).

Os valores de tensão elétrica, corrente de descarga, resistência interna, e demais informações referentes ao comportamento da célula, são obtidos na

folha de dados do fabricante, que pode ser encontrada pelo código escrito no corpo da célula, em geral ao lado do nome do fabricante.

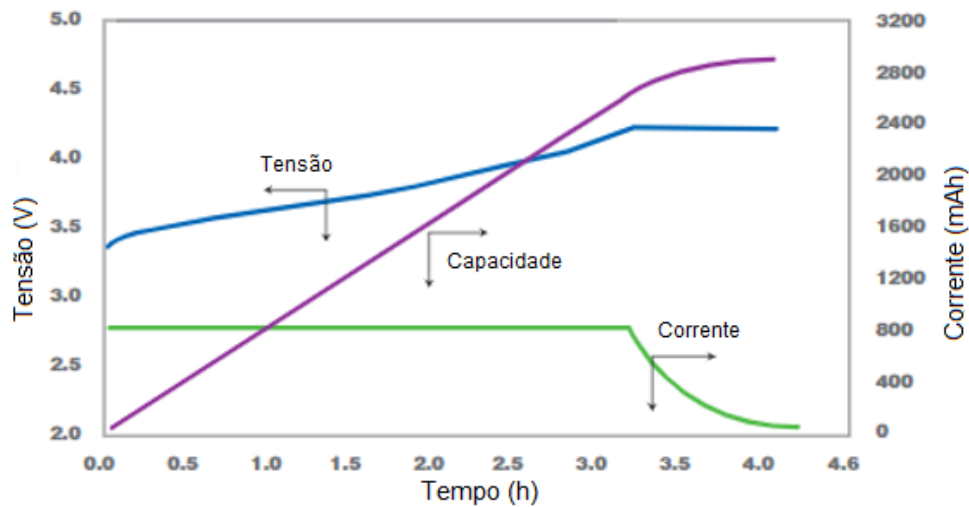
Segundo o fabricante de células Samsung, uma célula 18650 não pode ser carregada de forma linear, aplicando-se uma tensão constante e uma corrente constante. (SAMSUNG, 2022). O método indicado de se efetuar a carga é por meio de um gerenciamento de corrente e tensão.

Assim, na figura 5 é possível observar que inicialmente a tensão elétrica vai aumentando linearmente, enquanto a corrente permanece constante. Quando a célula se aproxima da capacidade máxima de carga, a tensão é estabilizada geralmente em 4,2V, e a corrente decresce em uma função exponencial tendendo a 0A.

Por meio dos estudos realizados, comparando os diversos fabricantes, foi possível constatar que o modelo de curva mostrado acima se aplica para todos os modelos de células de íon-Lítio 18650. Isso significa que para efetuar a carga de uma célula pode-se utilizar um carregador genérico que respeite as características elétricas informadas na ilustração.

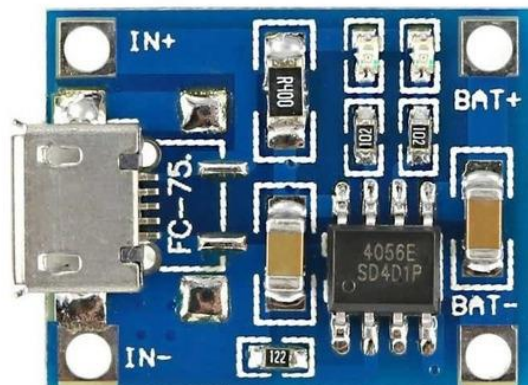
Um dispositivo de fácil acesso no mercado e que faz o gerenciamento de carga deste modelo de célula, é o circuito integrado TP 4056. Este componente é encontrado junto a circuitos auxiliares, que possibilitam conectar a célula e aguardar o carregamento, sem a necessidade de monitorar o comportamento das curvas de tensão e corrente para garantir uma carga correta da célula. Na figura 6 é possível observar uma placa de carregamento contendo o circuito integrado TP-4056.

Figura 5 - Curva Característica de carga da célula NCR 18650 – Panasonic



Fonte: Adaptado de Panasonic (2020).

Figura 6 - Placa de carregamento para células 18650



Fonte: Alibaba Group - Aliexpress (2022).

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir estão apresentados artigos com conteúdos relacionados e abordados neste trabalho, que colaboraram no desenvolvimento deste TCC.

Na dissertação de mestrado, Sistema fotovoltaico autônomo para sistemas de iluminação utilizando células reutilizadas de lítio, de (Gonçalves, 2017) é proposta a utilização de baterias de íon-lítio recicladas para um sistema autônomo de iluminação, é possível verificar a viabilidade de se utilizar células

de íon-lítio usadas em aplicações onde a taxa de descarga não seja superior a 1C.

O artigo, O potencial de reutilização as células e íon lítio de baterias de notebooks descartadas: Análise em termos de sustentabilidade, (Pereira, S., Conceição, V. M. D. ., Kohler, V. L. C., Aguiar, G. A. de, & Santilio, F. P. . (2022)), apresenta um ensaio realizado para reaproveitamento de células de íon-lítio retiradas de baterias de notebook. Neste trabalho as células retiradas foram divididas em dois grupos, um com tensão inicial maior que 3V e outro com tensão menor que 3V, sendo as células do primeiro grupo consideradas inicialmente funcionais, enquanto as outras não. Após esta etapa o grupo realizou uma tentativa de reativação das células com tensão menor que 3V, conectando-as em paralelo com células de tensão superior a 4V por 10 minutos, com o intuito de reativar os compostos internos e elevar a tensão da célula de menor valor. Após a reativação as células permaneceram em repouso por 2 dias e ao final desse período as unidades que apresentavam tensão superior a 3V eram aptas para o teste de carga e descarga. O trabalho ainda desconsiderou para o teste final de descarga as células que sofreram sobreaquecimento no processo de carga ou apresentaram danos químicos aparentes, como vazamento de fluídos ou marcas de oxidação.

Na etapa de carga foi utilizado o equipamento da iMAX B6 da SkyRC e para o teste de descarga o equipamento T240 DUO AC/DC da HTRC. Os resultados obtidos mostraram que a média de corrente obtida nos testes de descarga foi de 1714 mAh. O trabalho ainda apresenta informações que ilustram os estados de conservação das células e os percentuais em relação ao montante analisado, conforme mostrado na figura 7.

Figura 7 - Distribuição do estado de conservação das células analisadas



Fonte: (Pereira, S., Conceição, V. M. D. ., Kohler, V. L. C., Aguiar, G. A. de, & Santilio, F. P. . (2022)).

É possível notar que de um total de 240 células, apenas 104 foram aptas a passar pelo teste de descarga, que totalizou uma corrente média de descarga de 1714mAh neste grupo, e um total de 743 mAh se for analisada toda a amostra de 240 células.

3 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho consiste na análise de baterias de notebook usadas, visando o reaproveitamento das células presentes no interior. Para isso, foram criados ensaios elétricos que permitiram mensurar dados, apresentados na revisão deste TCC, das células e que contribuíram para um diagnóstico do estado de conservação, possibilitando modelar um percentual matemático da quantidade de células que ainda se encontraram em condições de utilização para sistemas de iluminação *off-grid*. Os tópicos apresentam as etapas seguidas para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 COLETA DO MATERIAL PARA ENSAIS

Com o intuito de coletar a maior variação possível de amostras, foram selecionadas aleatoriamente 10 baterias, cuja soma total das células totalizaram 63 unidades.

Posteriormente, as baterias foram abertas para a retirada das células de íon-lítio 18650 contidas no interior dos notebooks trabalhados. Cada célula recebeu um código de identificação de 2 algarismos, que possibilitou a rastreabilidade de cada unidade ao longo dos ensaios realizados. O código está vinculado a todos os dados coletados antes e depois da abertura da bateria.

3.2 SEPARAÇÃO DAS CÉLULAS PARA O PROCESSO DE TESTAGEM

Para melhor organização, foi criada uma tabela dividida em linhas e colunas, cada linha foi preenchida com o código atribuído a cada célula, e as colunas foram preenchidas com as informações descritas abaixo:

- Tensão inicial, após primeiro período de repouso;
- Capacidade de corrente de descarga, Id.

3.3 PERÍODO DE REPOUSO E MEDIÇÃO DE TENSÃO

As células permaneceram em repouso por 24 horas a temperatura de 25°C após retiradas das baterias, para que as tensões se estabilizassem. Uma vez que cada célula foi retirada de uma associação dentro da bateria original, o que impacta numa variação das condições de ligação das células, mudando o valor de tensão momentaneamente.

Após esse período, foi efetuada e registrada a medição de tensão de cada código. Para realização da medição, foi utilizado um multímetro digital ET-202 Minipa. O processo de medição foi realizado uma única vez com a utilização das ponteiros do próprio multímetro, com o objetivo de verificar se há células com tensões zeradas, que impossibilitem o reaproveitamento.

3.4 CARREGAMENTO DAS CÉLULAS

As células foram carregadas por meio do circuito integrado TP – 4056, que foi adquirido no formato de placa de circuito, com os componentes já fixados, possibilitando uma maior agilidade na execução desta etapa. Este circuito gerencia o processo de carga, proporcionando uma curva de corrente e de tensão ideal para não danificar a célula, conforme especificado pelo fabricante (SAMSUNG, 2020).

Foi criado um dispositivo de carregamento com espaço físico para comportar 40 células simultaneamente, cada compartimento foi composto por um carregador TP-4056 e uma célula.

3.5 TESTE DE DESCARGA DAS CÉLULAS

A etapa de descarga possibilitou ter acesso a capacidade de corrente que cada célula é capaz de fornecer. Ela foi obtida conectando a célula em paralelo com um resistor de valor conhecido e mensurando o tempo necessário até que a tensão da célula atingisse o valor de corte de 2,80V. Conhecendo o tempo decorrido e o valor do resistor, foi possível calcular a corrente que é fornecida à carga pela célula.

Para realização deste ensaio de descarga foi criado um dispositivo utilizando um microcontrolador Arduino Uno, que fez o gerenciamento de descarga da célula sobre o resistor de valor conhecido. O sistema contou com um cálculo de tensão, um relé e um algoritmo que permitiu o cálculo de corrente que fluía da célula para a carga, possibilitando ao final estimar a corrente total fornecida dentro dos limites de tensão de operação informados pelos fabricantes. Ao final de cada ensaio os valores de corrente, foram registrados os dados para que as células pudessem ser direcionadas à construção de uma bateria voltada a um sistema de iluminação *off-grid*.

3.6 DEFININDO APLICAÇÕES

Existem diversas aplicações possíveis para baterias de lítio, algumas exigem maior capacidade de descarga, outras exigem uma autonomia maior, isso varia de acordo com cada aplicação. De acordo com Gonçalves (2017), como as células ensaiadas são reaproveitadas, não é recomendado que as aplicações necessitem de corrente maior que 1C, ou seja, uma vez a capacidade nominal da célula. Portanto, dentro deste limite, podem se destacar aplicações como:

- Baterias para luminárias de emergência;
- Baterias para estações meteorológicas;
- Baterias para sistemas *off-grid* de energia solar;
- Baterias para bancos de carregamento de celulares.

As células podem ser alocadas para todas as aplicações citadas acima, o que definirá qual célula escolher é a capacidade de fornecimento de corrente de cada situação específica. Assim, ao final deste trabalho, foram escolhidas 15 células para confecção de uma bateria de 12,6V, para um sistema de iluminação *off-grid*.

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com realização deste trabalho de conclusão de curso.

4.1 SELEÇÃO DAS BATERIAS PARA O ENSAIO

Para efetuar a escolha das baterias utilizadas nos ensaios procurou-se diversificar ao máximo os modelos, fabricantes e tamanhos das baterias, para coletar uma amostragem próxima do atual cenário encontrado nos pontos de reciclagem. A figura 9 ilustra as baterias selecionadas para o experimento.

Figura 8 - Baterias selecionadas para o projeto.



Fonte: O próprio autor (2023).

4.2 ABERTURA DAS BATERIAS E SEPARAÇÃO DAS CÉLULAS

As baterias selecionadas foram abertas com o auxílio de uma chave de fenda, um alicate universal e um martelo. Todo o processo foi realizado com a utilização de equipamentos de proteção individual, óculos e luvas, para manter a segurança durante o processo. A figura 10 apresenta as baterias abertas, prontas para separação das células.

Figura 09 - Baterias abertas com suas células disponíveis.



Fonte: O próprio autor (2023).

Após a abertura das baterias, as células foram separadas e identificadas com números de 1 a 58, conforme mostrado na Figura 11. Nesta primeira etapa de um total de 63 células, 5 foram descartadas por estarem enferrujadas e 3 foram descartadas por estarem com a tensão zerada, isto é, com defeito e não possível recarregar e, assim, poder ser aproveitadas. Isso resultou em um aproveitamento de 87% das células e indicando um potencial de aproveitamento.

Figura 10. Células identificadas para o uso



Fonte: O próprio autor (2023).

4.3 PERÍODO DE REPOUSO E MEDIÇÃO

As células anteriormente classificadas foram mantidas em repouso por 24h em um ambiente com temperatura média de 20°C, que posteriormente foram submetidas ao processo de medição com o multímetro ET-202 Minipa. Foram realizadas 3 medições por célula e calculada a média aritmética entre elas, o valor calculado foi utilizado para análise das informações.

4.4 CARREGAMENTO DAS CÉLULAS

Para o carregamento das células foi criado um dispositivo que comporta 40 unidades simultaneamente. O dispositivo foi criado com o auxílio de placas carregadoras TP-4056 e suportes plásticos para comportar as células 18650. A figura 12 ilustra o dispositivo montado com as células selecionadas já em processo de carregamento.

Figura 11 - Dispositivo de carregamento



Fonte: O próprio autor (2023).

4.5 TESTE DE DESCARGA DAS CÉLULAS

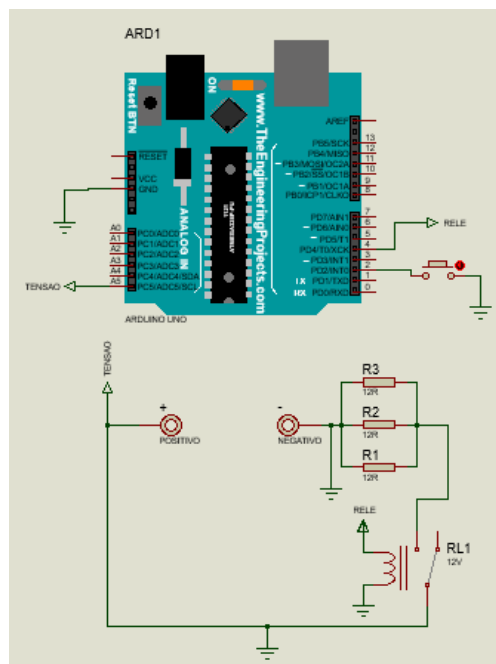
Para esta etapa do trabalho, foi utilizado um dispositivo que fornecesse um valor de corrente que a célula poderia entregar a carga. Para isso foi desenvolvido um equipamento que mensura a corrente que flui da célula para uma carga resistiva. Monitorando os valores de tensão e de tempo, é possível verificar a quantidade de corrente que flui da fonte para a carga.

O dispositivo para medição de corrente de descarga das células foi construído com os seguintes componentes:

- 1 Arduino uno;
- 1 Botão de acionamento;
- Cabo flexível 1,00mm²
- 1 Módulo relé compatível com o Arduino;
- 1 Suporte para comportar a célula 18650;
- 4 Resistores cerâmicos 12 Ω 10 W.

A figura 13 ilustra o esquema elétrico do equipamento.

Figura 12 - Diagrama de ligação dos componentes.



Fonte: O próprio autor (2023).

O dispositivo consiste em um circuito elétrico em série conectando uma célula 18650, uma resistência de valor conhecido e um relé eletromecânico controlado por um microcontrolador.

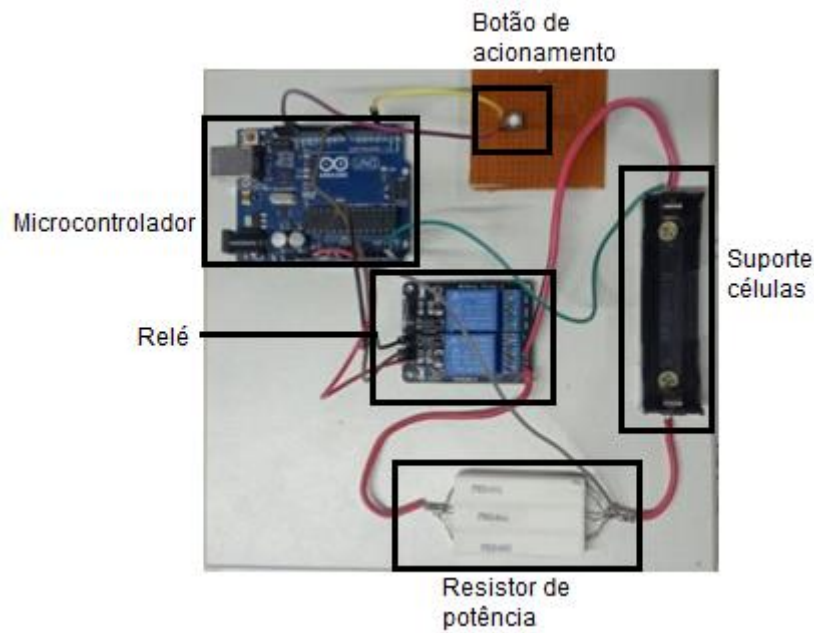
Com o auxílio do Arduino Uno, foi criado um algoritmo de programação que realiza o processo de medição de forma automática, comutando um relé eletromecânico, que faz a abertura e fechamento de um circuito elétrico entre a célula e a carga. O sistema foi configurado para efetuar a descarga a partir do acionamento de um botão e manter o teste em andamento até a tensão de corte atingir de 2,80V. Quando a tensão chega neste valor, o relé abre o circuito e interrompe a descarga automaticamente. O mesmo botão de acionamento possui a função de interromper o teste, caso seja necessário.

Como elemento resistivo de carga, foram utilizados 3 resistores cerâmicos de 12 Ω e 10W cada, ligados em paralelo totalizando 4,0 Ω e 30W (valores calculados). Foi realizado um processo de medição de resistência nos terminais de conexão com as células, para isso o relé foi acionado de forma manual e com o auxílio do multímetro ET-1002-MINIPA foram realizadas 3 leituras de resistência, acionando e desligando o relé a cada medição. O resultado médio encontrado foi de 4,0 Ω .

As conexões entre os resistores foram realizadas com estanho, e os condutores utilizados nas ligações foram de 1,50mm² da marca Corfio, capazes de suportar uma corrente de até 15 A. Sabendo que a célula inicia o processo de descarga a 4,20V, a máxima corrente de descarga, no início do teste, será de 1,05A. Isso significa que os conectores escolhidos suportam mais que 14 vezes essa capacidade, ou seja, as perdas por efeito Joule são desprezíveis neste cenário.

Por meio da figura 15 é possível observar o dispositivo montado sobre uma base de MDF da forma mais compacta possível, para minimizar perdas.

Figura 13. Circuito montado.



Fonte: O próprio autor (2023).

4.5.1 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA O MICROCONTROLADOR

O algoritmo criado calcula os seguintes dados que são apresentados na tela do computador por meio da interface do próprio Arduino, durante o processo de medição:

- Tempo decorrido após o início do teste;
- Corrente instantânea de descarga;
- Tensão instantânea da célula;
- Corrente total fornecida pela célula até o momento.

O código está apresentado de forma comentada no apêndice A, ao final deste trabalho.

4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESCARGA

Os valores de corrente de descarga encontrados com o auxílio do dispositivo apresentado anteriormente estão compilados na tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios.

Código célula	Tensão inicial (V)	Capacidade testada (mAh)	Código célula	Tensão inicial (V)	Capacidade testada (mAh)
1	0,93	2418	33	2,09	998
2	0,58	325	34	1,34	2278
3	0,94	2204	35	2,10	1012
4	1,06	2138	36	1,74	2083
5	1,80	2105	37	1,25	2260
6	1,16	2327	38	1,80	2258
7	1,15	2284	39	2,05	1331
8	1,10	2122	40	1,81	2247
9	1,49	1766	41	2,03	1022
10	2,38	1735	42	2,08	220
11	0,98	2294	43	1,75	2186
12	0,98	2386	44	1,74	2218
13	1,47	1695	45	2,10	1394
14	2,31	1720	46	1,75	2186
15	2,09	1735	47	2,05	550
16	1,16	2029	48	1,74	2163
17	1,82	2122	49	1,80	2248
18	1,69	2148	50	1,93	1587
19	0,58	520	51	2,21	1382
20	1,91	2090	52	1,34	1484
21	2,09	1879	53	0,56	780
22	1,91	2113	54	0,56	869
23	0,87	2709	55	1,37	1462
24	1,34	2268	56	Enferrujada	0
25	1,25	2293	57	Enferrujada	0
26	1,42	2329	58	Enferrujada	0
27	1,69	2185	59	Enferrujada	0
28	1,41	2340	60	Enferrujada	0
29	1,42	2320	61	0	0
30	1,34	2353	62	0	0
31	1,75	2139	63	0	0
32	1,25	2340			

Fonte: O próprio autor (2023).

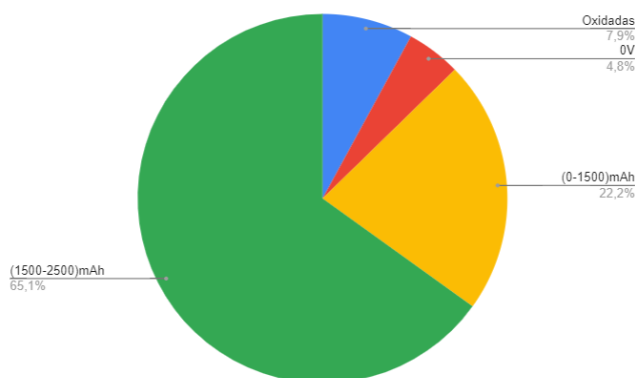
Analisando as informações, é possível constatar que o valor médio de corrente de descarga obtido nas 55 células aptas ao teste foi de 1848 mAh, 7,7% a mais que os 1714 mAh obtidos pelo trabalho de Pereira, S. (2022). Essa diferença de resultados entre os estudos pode ser apontada pela qualidade do material que foi coletado, incertezas no processo de medição e variáveis relativas ao armazenamento do material antes do ensaio, visto que a armazenagem do resíduo eletrônico nem sempre é feita da mesma forma.

As incertezas de medição estão atreladas a construção do equipamento, haja visto que a leitura de tensão é feita por meio de um microcontrolador que usa a tensão de referência da USB do computador para calcular a tensão da célula, portanto cada vez que o dispositivo é ligado pela primeira vez num dispositivo, se faz necessária a aferição da tensão fornecida pela USB.

Outro fator que contribui para a incerteza no cálculo de corrente é a resistência total entre a célula e a carga, que engloba todas as partes do circuito que compõe essa ligação em série, ou seja, suporte para a célula, cabos de conexão, relé e a própria carga. Por isso, com o relé acionado, foi efetuada uma leitura de resistência diretamente nos pontos de conexão da célula e não somente no resistor de carga.

Com base nos valores obtidos e apresentados na figura 16, é possível analisar o percentual de células enferrujadas, com tensões zeradas e com capacidades separadas de 0mAh a 1500mAh e de 1501mAh a 2500mAh

Figura 14 - Resultados dos ensaios de capacidade das células



Fonte: O próprio autor (2023).

É possível analisar que mais de 65% das células testadas apresentam uma capacidade de 1500mAh ou mais. Levando em conta que o valor típico de corrente de uma célula de bateria de notebook é de 2500mah, pode-se afirmar que mais de 65% das células ensaiadas possuem ainda pelo menos 60% da capacidade de armazenamento.

Analisando a amostragem completa, incluindo as células descartadas para o ensaio, o valor médio de corrente obtido foi de 1613mAh, pressupondo o valor de referência de 2500mAh de uma célula nova, pode-se dizer que o material descartado como resíduo eletrônico ainda possui um potencial médio de armazenamento de energia de 64,5% em relação a capacidade original, destacando cada célula possui uma capacidade de armazenamento específica, obtida após os ensaios.

Com base nestes resultados, pode-se afirmar que há uma possibilidade de reaproveitamento das baterias de Íon-Lítio descartadas, resgatando parte de das células para reaproveita-las em novas aplicações, como por exemplo em um sistema de iluminação autônomo, que demanda uma baixa corrente instantânea.

4.7 CONFECÇÃO DE UMA BATERIA DE ÍON-LÍTIO COM AS CÉLULAS ENSAIADAS

Foram selecionadas as 15 células com maior capacidade de descarga ensaiadas, totalizando um valor médio de 2166mAh. A bateria foi confeccionada conectando 5 células em paralelo, totalizando 3 conjuntos de 10830mAh, e posteriormente ligando estes conjuntos em série, totalizando 12,6V. A bateria montada possui uma potência de 136,5W.

As células foram unidas com uma fita niquelada e soldadas com o auxílio de uma solda ponto. Foi ainda adicionada uma BMS de 12,6V, 40A para o gerenciamento de carga e descarga do pack de células montado, conforme ilustrado na figura 16.

Figura 15. Bateria Montada

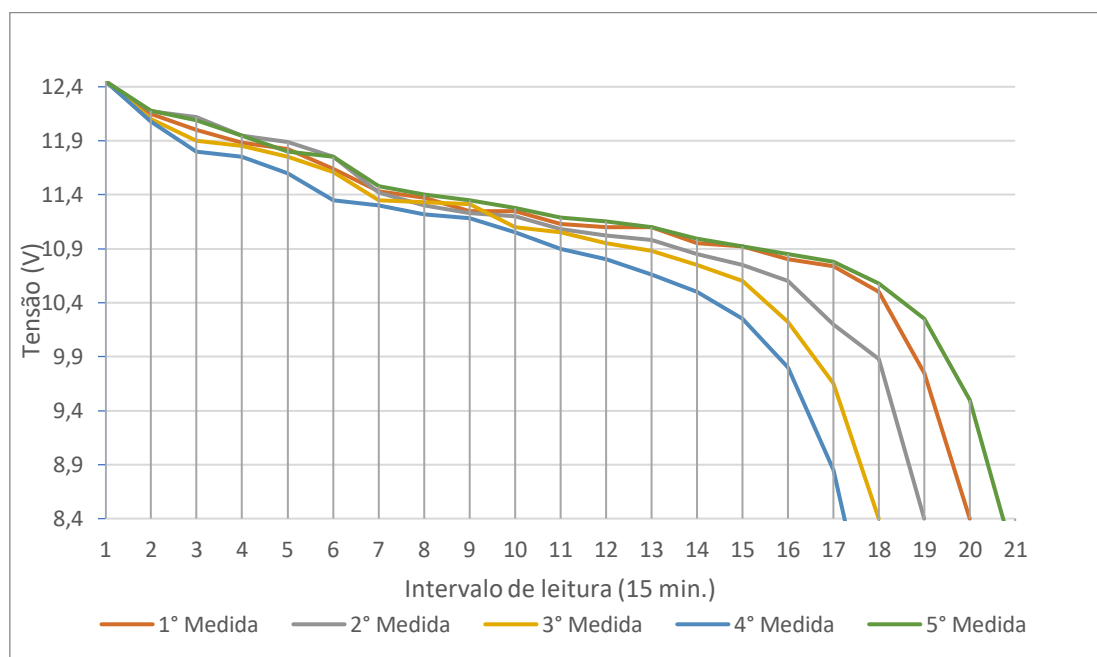


Fonte: O próprio autor (2023).

4.7.1 TESTE DE AUTONOMIA DA BATERIA

Inicialmente a bateria foi carregada com o auxílio de uma fonte de bancada a uma tensão de 12,6V x 2A, por um período de 6 horas. Uma vez carregada, a bateria foi conectada a uma lâmpada incandescente de 12V x 25W, que consome uma corrente de 2,08A, ou 0,2C desta bateria. Com o auxílio do multímetro ET-202 Minipa, foram realizadas medições de tensão a cada 15 minutos, com o intuito de gerar uma curva de comportamento típica de descarga da bateria. Este processo foi repetido 5 vezes para a carga de 25W, resultando em dados que possibilitaram traçar as curvas de carga apresentadas na figura 17.

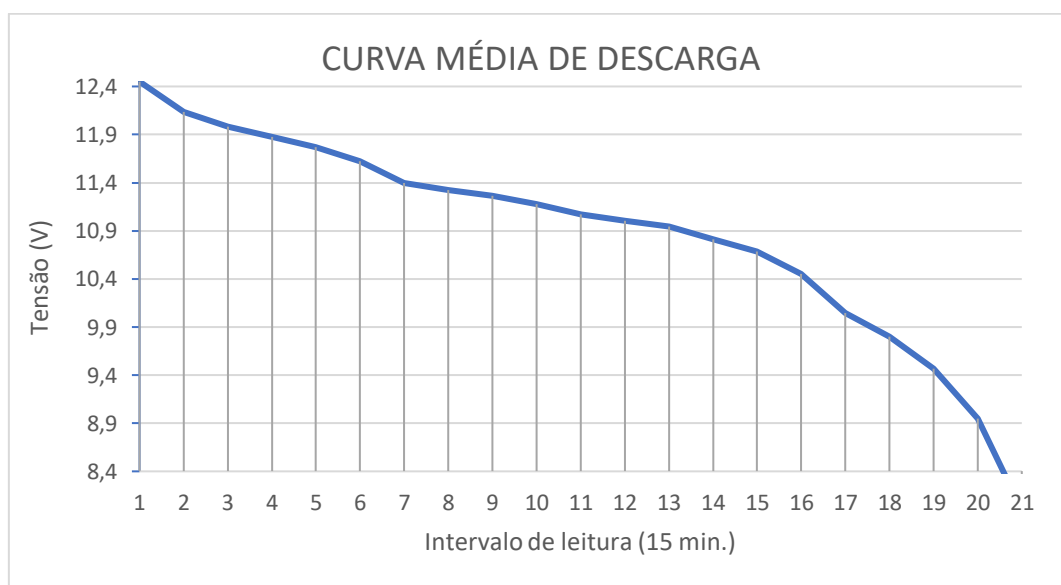
Figura 16 – Curvas de descarga da bateria construída



Fonte: O próprio autor (2023).

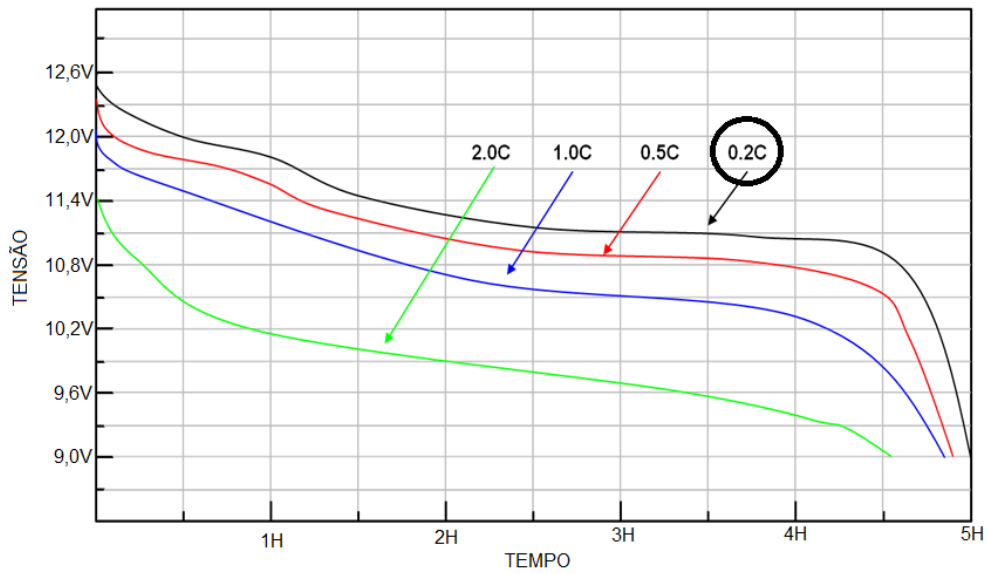
Com estes dados foi possível traçar uma curva média de descarga para os 5 ensaios realizados e compará-la com uma curva típica de descarga de uma bateria de 12,6V, conforme ilustrado na figura 18 e figura 19.

Figura 17 – Curva de descarga média da bateria confeccionada.



Fonte: O próprio autor (2023).

Figura 18 – Curva de uma bateria em diferentes cargas.



Fonte: Adaptado de STA eletrônica (2023).

Comparando a curva de descarga da bateria confeccionada com a curva de 0,2C da bateria apresentada acima, é possível notar que ambas possuem um comportamento similar, sem haver quedas súbitas de tensão ao conectar a carga, mantendo a constância durante o processo.

Levando em conta a potência 136,5 W da bateria confeccionada e o tempo médio que ela manteve a carga operando, é possível afirmar que sua autonomia condiz com o esperado, visto que ela manteve a lâmpada de 25W em funcionamento por uma média de 5,12 h.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de aproveitamento das baterias de notebook descartas, visando a possibilidade de reaproveitar as células de íon-lítio modelo 18650. Apesar de ser um trabalho de amostragem, foi possível obter resultados que indicam a possibilidade de reaproveitamento de células oriundas de baterias de notebooks oriundas de descarte eletrônico.

Os objetivos propostos neste trabalho foram cumpridos, mostrando que os resultados encontrados foram similares aos trabalhos analisados previamente ou as informações dos fabricantes. Isso confirma que há um potencial de reaproveitamento deste resíduo que hoje é descartado, possibilitando uma segunda vida as células remanescentes que ainda se encontram em funcionamento.

Pode-se ainda citar alguns itens que reforçam o potencial deste estudo, como o resultado obtido quanto ao aproveitamento das células, a resposta encontrada no ensaio de curva de descarga da bateria confeccionada, que é similar a uma bateria nova e o dispositivo criado para medir a descarga das células, cujo valor médio obtido pelas medições destoou 7,7% em relação a ao trabalho de (Pereira, S., Conceição, V. M. D. ., Kohler, V. L. C., Aguiar, G. A. de, & Santilio, F. P. . (2022)).

As principais dificuldades encontradas neste trabalho foram com o dispositivo de teste de descarga, que atualmente executa apenas um ensaio por vez, impactando no tempo de conclusão do ensaio.

Com este trabalho foi possível provar o potencial das células de íon-Lítio descartas, permitindo a construção de um *pack* de células capaz de fornecer a energia necessária para o acionamento de uma carga. Os resultados obtidos nos ensaios de descarga da bateria atestam que o método utilizado para ensaiar as células é válido e confiável, uma vez que a bateria alimentou a carga no tempo previsto, baseado nos ensaios de descarga realizados individualmente em cada célula.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- a) Visando uma maior eficiência do processo de testes abordado neste trabalho será necessário a construção de um dispositivo de descarga com maior capacidade de ensaios simultâneos, o que pode ser feito de forma mais eficaz com uma placa Raspberry Pi.
- b) Tendo em vista a demanda atual por baterias, é necessário um estudo mais aprofundado sobre o destino destes das baterias de notebook, pois sabe-se que boa parte do material que poderia ser reaproveitado não é acessado com facilidade.
- c) O potencial de um novo mercado se abre no Brasil em relação a células de Lítio retiradas de baterias de veículos elétricos. Esse é o próximo passo no estudo do reaproveitamento das baterias de Lítio, visto que o mercado de veículos elétricos está tomando cada vez mais espaço na cadeia automobilística. Assim como acontece com os notebooks, os carros também têm um ciclo de vida, e com isso novas portas se abrem para trabalhos como este.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 Resíduos Sólidos - Classificação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BRONDANI, Maria de Fátima. **Modelagem Matemática do Tempo de Vida de Baterias de Lítio Íon Polímero utilizando Algoritmos Genéticos**. Orientador: Paulo Sérgio Sausen, 2015 114 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí: 2015.

BROUSSELY, M.; PISTOIA, G.. **Industrial Applications of Batteries: From Cars to Aerospace and Energy Storage**. Oxford: Elsevier, 2007.

DUARTE, KELLY P., **Aplicação de um modelo híbrido para predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis**. Dissertação de mestrado, Ijuí, RS, Brasil, 2014.

GONÇALVES, Ulysses S.. **Sistema fotovoltaico autônomo para sistemas de iluminação utilizando células reutilizadas de lítio**. Dissertação de mestrado, Bragança, SP, Brasil, 2017.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B.. **Handbook of batteries**. 3. ed. New York: Mcgrawhill, 2002.

MENICTAS, Chris; SKYLLAS-KAZACOS, Maria; LIM, Tuti Mariana. **Advances in Batteries for Medium and Large-scale Energy Storage**. Cambridge: Elsevier, 2015.

PANASONIC. Panasonic UR18650A. [S.l.: s.n.], 2012. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/598212/PANASONICBATTERY/UR18650A/1537/1/UR18650A.html>.

Pereira, S., Conceição, V. M. D. ., Kohler, V. L. C., Aguiar, G. A. de, & Santilio, F. P. . (2022). O POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE ÍON LÍTIO DE BATERIAS DE NOTEBOOK DESCARTADAS: ANÁLISE EM TERMOS DE SUSTENTABILIDADE . *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar* - ISSN 2675-6218, 3(5), e351426.

SAAD, MARCELO C., **Controlador de carga e descarga de baterias microcontrolado com PIC, cm aplicação em sistemas de fornecimento de energia em geral, incluindo sistemas fotovoltaicos**. PUC Rio, 2012.

APÊNDICE A

ALGORITMO PARA CÁLCULO DE CORRENTE

```
// Declaração das constantes para os pinos do relé, resistor e botão
const int relayPin = 4;
const int resistorPin = A5;
const int buttonPin = 2;

// Resistência do resistor de potência em Ohms
const float resistorResistance = 4.0;
float voltage;
// Tensão de corte em Volts
const float voltageCutoff = 2.8;

// Variáveis para controle da descarga
unsigned long startTime = 0;
float elapsedTime = 0.0;
float current = 0.0;
float capacityAccumulated = 0.0;
bool testInProgress = false;
bool buttonState = false;
bool lastButtonState = false;

void setup() {
  // Define os pinos do relé, resistor e botão
  pinMode(relayPin, OUTPUT);
  digitalWrite(relayPin, HIGH); // Desliga o relé no início

  pinMode(resistorPin, INPUT);
  pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);

  // Inicia a comunicação serial
  Serial.begin(9600);
}
```

```

void loop() {
  // Lê o estado atual do botão
  buttonState = digitalRead(buttonPin);

  // Verifica se houve uma transição no estado do botão
  if (buttonState != lastButtonState) {
    // Verifica se o botão foi pressionado
    if (buttonState == LOW) {
      if (!testInProgress) {
        startDischarge(); // Inicia o teste de descarga
      } else {
        stopDischarge(); // Interrompe o teste de descarga
      }
    }
  }

  lastButtonState = buttonState;

  // Verifica se o teste está em andamento
  if (testInProgress) {
    // Lê a tensão no resistor e calcula a corrente em Ampères
    voltage = analogRead(resistorPin) * (4.66 / 1023.0);
    current = voltage / resistorResistance;

    // Calcula a capacidade acumulada em mAh
    float capacity = (current * elapsedTime) / 121;
    capacityAccumulated += capacity;

    // Exibe a corrente atual e a capacidade acumulada
    Serial.print("Tempo decorrido: ");
    Serial.print(elapsedTime, 2);
    Serial.println(" S");

    Serial.print("Tensão: ");
    Serial.print(voltage, 2);

```

```
Serial.println(" V");

Serial.print("Corrente: ");
Serial.print(current, 3);
Serial.println(" A");

Serial.print("Capacidade Acumulada: ");
Serial.print(capacityAccumulated);
Serial.println(" mAh");

Serial.println(" ");

// Verifica se a tensão de corte foi atingida
if (voltage <= voltageCutoff) {
    stopDischarge();
}

// Calcula o tempo decorrido em segundos
elapsedTime = (millis() - startTime) / 1000.0;
delay(1000);
}
}

void startDischarge() {
    Serial.println("Iniciando teste de descarga...");
    startTime = millis(); // Inicia a contagem de tempo
    testInProgress = true;
    digitalWrite(relayPin, LOW); // Liga o relé para iniciar a descarga
}

void stopDischarge() {
    Serial.println("Teste de descarga concluído.");
    testInProgress = false;
    digitalWrite(relayPin, HIGH); // Desliga o relé para encerrar a descarga
```

```
// Exibe a capacidade final
Serial.print("Tempo decorrido: ");
Serial.print(elapsedTime, 2);
Serial.println(" S");

Serial.print("Tensão: ");
Serial.print(voltage, 2);
Serial.println(" V");

Serial.print("Capacidade Final: ");
Serial.print(capacityAccumulated);
}
```