

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FEELT – FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO PEDRO SILVA MILAGRE

**REVISÃO HISTÓRICA E TECNOLÓGICA DAS BATERIAS
ENFATIZANDO OS MODELOS DE LÍTIO E DESENVOLVIMENTO DE
UM PROTÓTIPO PARA O CARREGAMENTO SIMULTÂNEO DE
DUAS CÉLULAS DE LI-ÍON**

Uberlândia

2023

JOÃO PEDRO SILVA MILAGRE

**REVISÃO HISTÓRICA E TECNOLÓGICA DAS BATERIAS
ENFATIZANDO OS MODELOS DE LÍTIO E DESENVOLVIMENTO DE
UM PROTÓTIPO PARA O CARREGAMENTO SIMULTÂNEO DE
DUAS CÉLULAS DE LI-ÍON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletroquímica e
Eletrônica.

Orientador: Gustavo Brito de Lima

Coorientador: Daniel Pereira de Carvalho

Uberlândia

2023

JOÃO PEDRO SILVA MILAGRE

**REVISÃO HISTÓRICA E TECNOLÓGICA DAS BATERIAS
ENFATIZANDO OS MODELOS DE LÍTIO E DESENVOLVIMENTO DE
UM PROTÓTIPO PARA O CARREGAMENTO SIMULTÂNEO DE
DUAS CÉLULAS DE LI-ÍON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletroquímica e
Eletrônica.

Uberlândia, 21 de novembro de 2023.

Banca Examinadora:

Gustavo Brito de Lima – Doutor (UFU)

Carlos Eduardo Tavares – Doutor (UFU)

Luciano Coutinho Gomes – Doutor (UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que depositaram confiança e acreditaram em mim ao longo desta jornada acadêmica, especialmente aos meus familiares, cujo apoio e suporte foram fundamentais para a conclusão desta etapa em minha vida.

Agradeço também aos meus amigos, que tornaram toda essa jornada um momento mais alegre e divertido.

Agradeço aos meus respeitados professores pelos momentos de aprendizado e pelos esforços em elevar ao máximo meu potencial como estudante.

Agradeço ao LAMAU por proporcionar o espaço e a oportunidade onde pude aplicar o conhecimento adquirido ao longo da graduação em um projeto de extensão bastante ambicioso.

Agradeço à FEELT pela disponibilização dos laboratórios e por toda a equipe técnica e de secretaria, cuja competência foi crucial e ajudou a superar as dificuldades encontradas ao longo do curso e durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Ao longo dos últimos anos, o crescente aumento na adoção dos veículos elétricos e híbridos tem chamado a atenção, em grande parte devido à necessidade de tornar os meios de transporte mais sustentáveis. Esse crescimento foi viabilizado pelo avanço tecnológico no armazenamento de energia eletroquímica, com a introdução dos modelos de íons de lítio no mercado, a partir de 1991. Antes dessa tecnologia, o mercado de baterias secundárias era dominado pelos modelos de chumbo-ácido e níquel-cádmio. Em comparação com esses modelos, as baterias de íons de lítio representam um avanço significativo, principalmente por oferecerem uma melhoria na capacidade de armazenamento de energia em menor peso e espaço. Existem diversos modelos de baterias de lítio, categorizados de acordo com o material doador, sendo que cada um possui suas próprias características. Assim como em muitos países, a Associação Brasileira de Veículos Elétricos afirma um crescimento notável do setor de veículos elétricos e híbridos no Brasil. Esse avanço impulsiona a necessidade de manuseio em território nacional das células de íons de lítio, abrindo espaço para os equipamentos dedicados aos principais processos de teste, como o carregamento. Este trabalho oferece uma revisão conceitual sobre as baterias, apresentando os principais termos desse setor e uma revisão histórica dos modelos químicos predominantes em baterias primárias e secundárias ao longo do tempo, desde a criação da pilha voltaica, com ênfase na tecnologia das baterias de íons de lítio. Em seguida, apresenta o projeto de um controlador de carga para células de íons de lítio, capaz de operar adequadamente nos estágios necessários para o carregamento das células.

Palavras-chave: Baterias Primárias; Baterias Secundárias; Li-íon; Controle de Tensão e Corrente; Carregador de Células.

ABSTRACT

Over the past few years, the increasing adoption of electric and hybrid vehicles has drawn attention, largely due to the need to make transportation methods more sustainable. This growth has been made possible by technological advancements in electrochemical energy storage, with the introduction of lithium-ion models into the market since 1991. Prior to this technology, the secondary battery market was dominated by lead-acid and nickel-cadmium models. In comparison to these models, lithium-ion batteries represent a significant advancement, mainly by offering improved energy storage capacity in less weight and space. There are several lithium battery models categorized according to the donor material, each with its own characteristics. Similar to many countries, the Brazilian Association of Electric Vehicles affirms a notable growth in the electric and hybrid vehicle sector in Brazil. This progress drives the need for handling lithium-ion cells within the national territory, creating room for equipment dedicated to key testing processes, such as charging. This work provides a conceptual review of batteries, presenting the main terms of this sector and a historical review of the predominant chemical models in primary and secondary batteries over time, since the creation of the voltaic pile, with an emphasis on lithium-ion battery technology. Following this, it presents the design of a charge controller for lithium-ion cells capable of operating appropriately during the necessary stages for cell charging.

Keywords: Primary Batteries; Secondary Batteries; Li-ion; Voltage and Current Control; Cell Charger.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo R_{int} de uma célula de li-íon.	17
Figura 2.2 - Modelo de Thevenin de uma célula li-íon.	18
Figura 2.3 - Modelo DP de uma célula de li-íon.	18
Figura 2.4 - Ilustração da estrutura padrão das baterias.	20
Figura 2.5 - Exemplar da curva característica de descarga de uma célula de li-íon.....	20
Figura 2.6 - Exemplar da curva característica de carga de uma célula de li-íon.	21
Figura 2.7 - Curva de descarga da célula INR 18650-25R em diferentes taxas-C.....	22
Figura 2.8 - Comportamento da tensão e corrente ao longo do tempo no processo de carga. .	23
Figura 2.9 - Exemplar da pilha de Alexandre Volta.....	28
Figura 2.10 - Bateria de Leclanché.....	30
Figura 2.11 - Corte da bateria alcalina cilíndrica de zinco-dióxido de manganês.....	31
Figura 2.12 - Corte da bateria de botão de zinco-dióxido de manganês.	31
Figura 2.13 - Comparativo da densidade energética das baterias secundárias.....	35
Figura 2.14 - Célula cilíndrica de li-íon.	36
Figura 2.15 - Célula prismática de li-íon.....	37
Figura 2.16 - Célula pouch de li-íon.....	37
Figura 2.17 - Gráfico teia das baterias LCO.....	38
Figura 2.18 - Gráfico teia da bateria LFP.....	39
Figura 2.19 - Gráfico teia da bateria NCA.	41
Figura 2.20 - Gráfico teia da bateria NMC.....	42
Figura 3.1 - Ilustração de um carregamento de uma célula de li-íon.	45
Figura 3.2 - CI L200 pentawatt.	47
Figura 3.3 - Esquemático do L200.	47
Figura 3.4 - Circuito base do L200.....	48
Figura 3.5 - Circuito do L200 como regulador de tensão e corrente.....	49
Figura 3.6 - Circuito regulador de tensão e corrente.	50
Figura 3.7 - Esquemático do INA210.....	51
Figura 3.8 - Circuito sensor de corrente.	51
Figura 3.9 - Circuito de um amplificador não-inversor.....	52
Figura 3.10 - Esquemático do LM224.....	53
Figura 3.11 - Circuito comparador.	54
Figura 3.12 - Circuito de potência para a simulação no LTSpice.	55

Figura 3.13 - Valores da tensão V_{ce1} do circuito de potência.	55
Figura 3.14 - Circuito de sinalização no LTSpice.	56
Figura 3.15 - Resultado da simulação do circuito de sinalização, para 500 mA e 3,6 V.	56
Figura 3.16 - Resultado da simulação do circuito de sinalização, para 101 mA e 4,2 V.	57
Figura 3.17 - Resultado da simulação do circuito de sinalização, para 98 mA e 4,2 V.	57
Figura 4.1 - Protótipo de teste.	58
Figura 4.2 - Exemplar da fonte de Bancada utilizada.	59
Figura 4.3 - Exemplar do multímetro Minipa MDM-8045.	59
Figura 4.4 - Fotografia do reostato ELETELE.	60
Figura 4.5 - Fotografia do reostato da edutec.	60
Figura 4.6 - Exemplar do reostato da Políterm.	61
Figura 4.7 - Exemplar de uma célula da SDI 18650-30Q.	61
Figura 4.8 - Carregamento realizado pela fonte.	63
Figura 4.9 - Teste de descarga das duas células.	64
Figura 4.10 - Carregamento da célula pelo protótipo de teste.	65
Figura 4.11 - Teste de carga da célula com o protótipo.	66
Figura 4.12 - Segundo teste de descarga na célula 2.	66
Figura 5.1 - Esquemático do circuito completo no EasyEDA.	68
Figura 5.2 - Circuito de carga 1.	69
Figura 5.3 - Circuito de carga 2.	69
Figura 5.4 - Circuito de sinalização.	70
Figura 5.5 - Circuito de entrada e saída.	70
Figura 5.6 - Montagem do layout da PCB.	71
Figura 5.7 - Layout da placa com a malha do terra.	71
Figura 5.8 - Ilustração 3D do protótipo.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros da célula Samsung INR 18650-25R.	23
Tabela 2.2 - Dados de comparação entre os modelos de baterias secundárias.....	34
Tabela 4.1 - Dados do teste de descarga.....	64
Tabela 5.1 – Orçamento completo.....	72
Tabela 6.1 - Folha de dados do protótipo.	73

LISTA DE SIGLAS

Li-íon	Íon de Lítio
HEV	Hybrid Electric Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
SoH	State of Helph
SoC	State of Charge
ESR	Equivalent Series Resistance
TRIMPOT	Trimmer Potentiometer
CI	Circuito Integrado
DP	Double Polarization
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
u.m	unidade de massa
u.v	unidade de volume
a.C	antes de Cristo
d.C	depois de Cristo
LiSO ₂	Lítio dióxido de enxofre
LiSOCl ₂	Lítio cloreto de tionila
LiSO ₂ Cl ₂	Lítio cloreto de sulfurila
LiMnO ₂	Lítio dióxido de manganês
LiFeS ₂	Lítio dissulfeto ferroso
LiCuO ₂	Lítio óxido de cobre
Pb-ácido	Chumbo ácido
Ni-Cd	Níquel-Cádmio
Ni-MH	Níquel-Hidreto Metálico
LiCo	Lítio Cobalto
LiFePO ₄	Lítio Ferro Fosfato
LiNiCoAl	Lítio Níquel Cobalto Alumínio
LiNiMnCo	Lítio Níquel Manganês Cobalto
LCO	Lítio Cobalto
LFP	Lítio Ferro Fosfato
NCA	Níquel Cobalto Alumínio

NMC	Níquel Manganês Cobalto
LMO	Lítio Manganês
LTO	Lítio Titanato
ABVE	Associação Brasileira de Veículos Elétricos
LED	Light-Emitting Diode
PCB	Printed Circuit Board
FEELT	Faculdade de Engenharia Elétrica
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
LAMAU	Laboratório de Mobilidade Automobilística e Urbana

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
<i>1.1.1 Objetivos Específicos.....</i>	<i>13</i>
1.2 Justificativa	14
1.3 Metodologia	14
1.4 Estrutura do Trabalho	15
2. REVISÃO CONCEITUAL E HISTÓRICA DAS BATERIAS	16
2.1 Conceitos Fundamentais	16
2.2 História das Baterias	26
<i>2.2.1 A Primeira Bateria da História</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2 As Baterias Primárias.....</i>	<i>28</i>
<i>2.2.3 As Baterias Secundárias</i>	<i>33</i>
2.3 A Tecnologia das Baterias de Íons de Lítio	36
<i>2.3.1 Lítio Cobalto Óxido (LCO).....</i>	<i>38</i>
<i>2.3.2 Lítio Ferro Fosfato (LFP)</i>	<i>39</i>
<i>2.3.3 Níquel Cobalto Alumínio (NCA).....</i>	<i>40</i>
<i>2.3.4 Níquel Manganês Cobalto (NMC).....</i>	<i>41</i>
<i>2.3.5 Demais Químicas e Modelos</i>	<i>42</i>
3. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	44
3.1 Circuito de Potência	46
3.2 Circuito de Sinalização.....	50
3.3 Simulações dos Circuitos.....	54
4. EXPERIMENTOS NO CIRCUITO DE POTÊNCIA.....	58
4.1 Materiais utilizados	58
4.2 Descrição prática	62
<i>4.2.1 Teste de capacidade da célula</i>	<i>62</i>
<i>4.2.2 Teste de desempenho do circuito de potência</i>	<i>65</i>
5. FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO	68
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS	75

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o aumento na produção das baterias de íons de lítio (li-íon) tem sido considerável. Pode-se afirmar que as razões para isso se devem à produção dos veículos elétricos híbridos (HEVs – *Hybrid Electric Vehicles*) e veículos elétricos a bateria (BEVs – *Battery Electric Vehicles*), ao aumento recorrente do consumo de aparelhos eletroportáteis e à redução do valor do kWh em aproximadamente 90% nos últimos 12 anos das baterias de li-íon (BNEF, 2023).

Baseando-se na redução dos preços das baterias de lítio, era esperado que a produção em massa dos HEVs e BEVs se tornasse economicamente plausível. Esse cenário é reforçado pelos incentivos tributários que esses modelos recebem devido à menor degradação ambiental em comparação com os tradicionais veículos à combustão. Sendo assim, logicamente, prevê-se que a produção anual crescente das baterias de lítio continue.

Para a produção de uma bateria de lítio, o *pack* é composto por diversas unidades de baterias menores, chamadas de células. Tais células são conectadas umas às outras, seja em paralelo (para aumentar a capacidade e a carga/descarga de corrente) ou em série (para aumentar a tensão). Outro componente primordial para um bom *pack* é o Sistema Gerenciador de Bateria (BMS – *Battery Management System*). A principal função do BMS é acompanhar o comportamento de cada linha (grupo de células em paralelo) durante os processos de carga e descarga para evitar que alguma linha entre em estado de operação indesejado.

Durante a produção de uma bateria comercial, algumas regras devem ser respeitadas para garantir um produto de alta qualidade. Por exemplo, todas as células devem ser do mesmo modelo, garantindo assim características e construção química semelhantes. Isso assegura uma melhor atuação do BMS, normalmente programado com base em parâmetros relacionados à estrutura química. Além disso, elas precisam ser novas e estar no mesmo Estado de Saúde (SoH – *State of Health*) e Estado de Carga (SoC – *State of Charge*), ou seja, todas as células devem apresentar boa saúde e capacidade.

Para garantir que uma célula apresente bons parâmetros, é normal realizar experimentos antes da comercialização. Os experimentos mais comuns incluem os testes de carga, descarga e Resistência em Série Equivalente (ESR – *Equivalent Series Resistance*). Durante os testes de carga e descarga, são avaliados os níveis de tensão, sua curva característica e a quantidade de energia entregue ou absorvida. No teste de ESR, observa-se o valor de sua resistência série, sendo ideal um valor menor, indicando que menos energia será dissipada em forma de calor.

Também é comum que as células passem por ciclos de carga e descarga antes de serem incorporadas a um pack, a fim de evitar a perda de capacidade por inatividade. Sendo assim, é importante que esses ciclos sejam realizados de maneira similar às recomendações do fabricante, pois uma execução inadequada pode resultar em problemas nas células. Uma observação é que essa perda pode ser mitigada caso a bateria seja mantida na chamada “tensão de armazenamento” durante o período de ociosidade.

1.1 Objetivos

O objetivo inicial deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica contendo os principais modelos químicos de baterias primárias e secundárias, abordando aspectos históricos. Em seguida, serão apontadas as diferentes características das principais tecnologias de li-íon disponíveis no mercado atual. Por fim, o propósito do trabalho é desenvolver um protótipo capaz de controlar o processo de carga das células de íons de lítio, garantindo uma boa versatilidade, sendo adequada para os mais diversos modelos e estruturas, e boa estabilidade na corrente fornecida à célula.

O projeto conta com um circuito eletrônico capaz de atuar como controlador de tensão e corrente. A ideia é apresentar um protótipo que possa ser facilmente adaptável, permitindo modificação dos níveis de saída com a ajuda de Potenciômetros de Ajuste (TRIMPOTs – *Trimmer Potentiometer*). Para este projeto, vamos considerar o carregamento simultâneo de até 2 células. Porém, utilizando a mesma lógica, é plausível adicionar mais circuitos em paralelo até atingir a capacidade máxima de entrega de corrente da fonte de energia externa.

1.1.1 *Objetivos Específicos*

As metas a serem atingidas para o estudo bibliográfica e a implementação do circuito controlador de carga das células são:

- a) Apresentar, por meio de referências, os principais modelos químicos de baterias ao longo do tempo, desde sua invenção;
- b) Apresentar os diferentes modelos químicos das baterias com íons de lítio, descrevendo suas principais características;
- c) Desenvolver um circuito capaz de controlar adequadamente o carregamento das células de li-íon, incluindo sinalização ao final do processo de carga;
- d) Realizar simulações dos diferentes circuitos do protótipo;

- e) Testar a execução do circuito de potência (ou controlador de tensão e corrente);
- f) Validar os resultados obtidos;
- g) Propor possíveis melhorias.

1.2 Justificativa

Com o intenso crescimento do setor de BEVs, e HEVs, as baterias, especialmente os modelos de íons de lítio, ganharam muito destaque nos últimos anos. Com isso é importante conhecer a trajetória para entender por que seu surgimento representa um salto evolutivo no armazenamento eletroquímico de energia.

Além disso, será cada vez mais comum o uso de equipamentos de bancada para realização dos testes em células, sendo eles carregadores, cargas eletrônicas ou medidores de ESR. Para realizar o carregamento de uma célula, basta conectá-la em paralelo com uma fonte que fornece as condições ideais de carga para ela. Para isso, temos os carregadores próprios, tanto em nível comercial, quanto em nível industrial, outra forma é fazer uso de uma fonte de bancada.

Dito isso, um protótipo capaz de realizar o carregamento individual das células, com a possibilidade de ser facilmente regulável, conseguindo atuar para diferentes modelos simultâneos e fazendo um melhor aproveitamento das fontes de bancada, pode ser uma opção interessante.

1.3 Metodologia

Como metodologia de estudo, temos uma pesquisa teórica, análise por simulação, testes práticos do protótipo e sua fabricação. A pesquisa será realizada buscando os diversos artigos que abordem a história, evolução e características dos principais modelos químicos de bateria existentes até o momento presente. A simulação será realizada com o auxílio do *software* LTSpice. Os experimentos práticos visam proporcionar uma melhor compreensão do comportamento do circuito de potência. Os equipamentos de bancada utilizados nos testes incluem multímetros, fontes de bancada e reostatos.

Todo o projeto será dividido nas seguintes etapas:

- Etapa 1: pesquisa e elaboração de um referencial teórico, ou seja, reunir todos os artigos e livros que possam ser úteis para o desenvolvimento do trabalho;
- Etapa 2: desenvolvimento do referencial teórico;

- Etapa 3: estudo do Circuito Integrado (CI) e dos possíveis circuitos eletrônicos que possam atuar conforme desejado;
- Etapa 4: simulação de todos os circuitos que compõem o protótipo;
- Etapa 5: experimento em bancada do circuito de controle de carga;
- Etapa 6: validação dos resultados;
- Etapa 7: conclusão do projeto e propostas de melhorias.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 6 capítulos. O primeiro é a introdução, que tem como objetivo explicar brevemente a importância deste estudo, os objetivos e os processos para o desenvolvimento do protótipo. O segundo capítulo engloba uma revisão histórica e bibliográfica das baterias, com ênfase na química de lítio. No terceiro capítulo, temos o desenvolvimento do protótipo, apresentando suas principais características e funções, além das simulações. No quarto temos os experimentos realizados no protótipo com seu desempenho e resultado. No quinto apresentamos a produção e o orçamento para a fabricação do protótipo. Por fim, no sexto capítulo, estão as conclusões com as principais perspectivas, incluindo melhorias futuras.

2. REVISÃO CONCEITUAL E HISTÓRICA DAS BATERIAS

É amplamente reconhecido que o armazenamento de energia está se tornando cada vez mais fundamental e presente na sociedade contemporânea. Atualmente, o uso de dispositivos eletroportáteis, como notebooks, celulares entre outros, impulsiona um mercado global de escala significativa. Por exemplo, o mercado de *smartphones* movimenta, em média, aproximadamente 300 milhões de aparelhos a cada trimestre, como aponta (CANALYS, 2022). Além disso, a geração de energia fotovoltaica e o avanço dos veículos elétricos têm ganhado destaque no mercado a cada ano, uma vez que representam meios de mitigar os danos ambientais.

O armazenamento de energia é de suma importância para o setor industrial e desempenha um papel significativo no contexto da transição energética rumo a fontes mais sustentáveis. Diversas abordagens são empregadas para tal finalidade, sendo este trabalho focado no armazenamento eletroquímico, especialmente utilizado na produção de baterias e capacitores. Nesse contexto, as baterias permitem o armazenamento da energia elétrica na forma de energia química, e, assim como nos capacitores, compreende dois eletrodos distintos, um positivo (cátodo) e um negativo (ânodo) (WHITTINGHAM, 2012).

Nesse capítulo vamos realizar uma revisão bibliográfica referente aos conceitos fundamentais, a história e o avanço tecnológico das baterias, finalizando com um estudo mais enfático nos modelos de íons de lítio.

2.1 Conceitos Fundamentais

Antes de adentrarmos no tema, é fundamental compreender que a célula representa a unidade elementar na constituição de baterias, independentemente de seu tipo, como, por exemplo, baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio ou lítio. Essas células são agrupadas e conectadas para compor o *pack* de baterias. Logo, podemos afirmar que as células são como baterias de menor escala. As interligações entre as células podem ser realizadas em configurações série e/ou paralela, selecionadas de acordo com as especificidades de cada projeto.

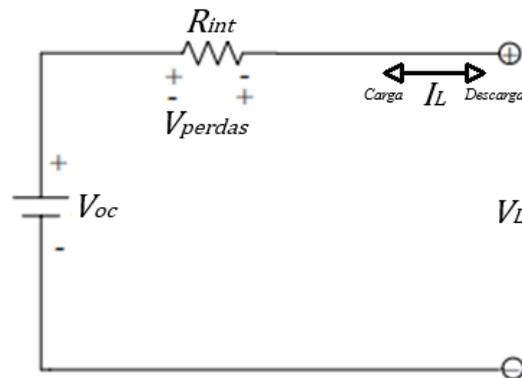
Quando abordamos o tema ‘Baterias’, nos deparamos com uma extensa variedade de termos que recebem menos ou nenhuma atenção durante o período de graduação. Sendo assim, é interessante apresentar os mais relevantes e sua respectiva importância. Durante a execução

de um projeto, a consideração da grande maioria desses parâmetros é fundamental, e é possível encontrá-los nas folhas de dados de cada modelo de célula ou calculá-los com base nos valores apresentados.

As baterias podem ser subdivididas em dois grandes grupos: baterias primárias e baterias secundárias. As baterias primárias são aquelas que não são recarregáveis ou têm dificuldade em serem carregadas, sendo geralmente descartadas após o uso. Por outro lado, as baterias secundárias são recarregáveis por natureza.

Inicialmente, vamos abordar o funcionamento físico de uma célula de íons de lítio. Na literatura, encontramos diversos modelos elétricos capazes de avaliar o desempenho de uma célula de li-íon, os mais comuns são encontrados em (HE; XIONG; FAN, 2011), e os principais podem ser vistos a seguir:

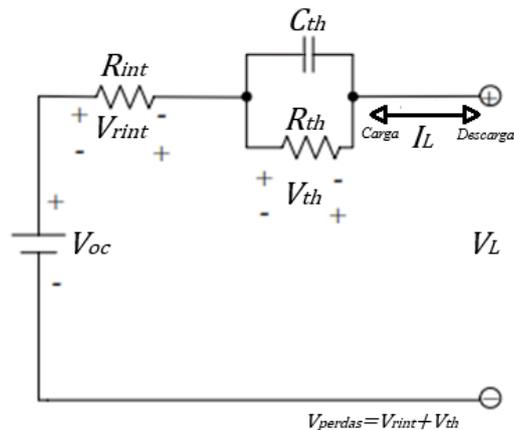
Figura 2.1 - Modelo R_{int} de uma célula de li-íon.



Fonte: Editada de (HE; XIONG; FAN, 2011)

O modelo apresentado na *Figura 2.1*, conhecido como modelo equivalente de resistência interna, é um dos mais comuns para a representação de uma bateria. No entanto, é bastante incompleto em relação aos demais, pois todas as características não podem ser resumidas apenas em uma resistência em série, uma vez que a célula apresenta atributos dinâmicos.

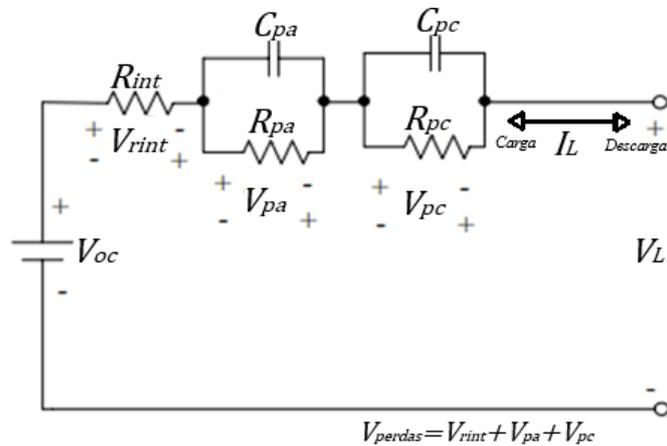
Figura 2.2 - Modelo de Thevenin de uma célula li-íon.



Fonte: Editada de (HE; XIONG; FAN, 2011)

O Modelo de Thevenin, apresentado na *Figura 2.2*, é um pouco mais completo, sendo capaz de apresentar as características dinâmicas da bateria, como os momentos transitórios durante a carga e descarga. Porém, ele apresenta uma certa instabilidade nos momentos finais de cada processo. Com o intuito de solucionar esse problema surge o esquemático da *Figura 2.3*, conhecido como Modelo de Polarização Dupla (DP – *Double Polarization*), capaz de refinar e estabelecer com boa precisão o comportamento da célula.

Figura 2.3 - Modelo DP de uma célula de li-íon.



Fonte: Editada de (HE; XIONG; FAN, 2011)

Portanto, como podemos observar, uma célula é representada por circuitos elétricos com a presença de resistores e capacitores para melhor representar suas características durante os processos de carga e descarga. V_{oc} se trata da tensão em circuito aberto, enquanto V_L é a tensão que pode ser medida no terminal da célula. Logo, se não houver passagem de corrente, temos que $V_L = V_{oc}$. Agora, se houver fluxo de corrente no sentido de carga, temos $V_L = V_{oc} + V_{perdas}$

e, em descarga, $V_L = V_{oc} - V_{perdas}$. Já o termo R_{int} se refere à ESR, um dado muito importante geralmente encontrado nas folhas de dados, pois é nele que obtemos as informações de outros dois parâmetros cruciais: o SoC e o SoH.

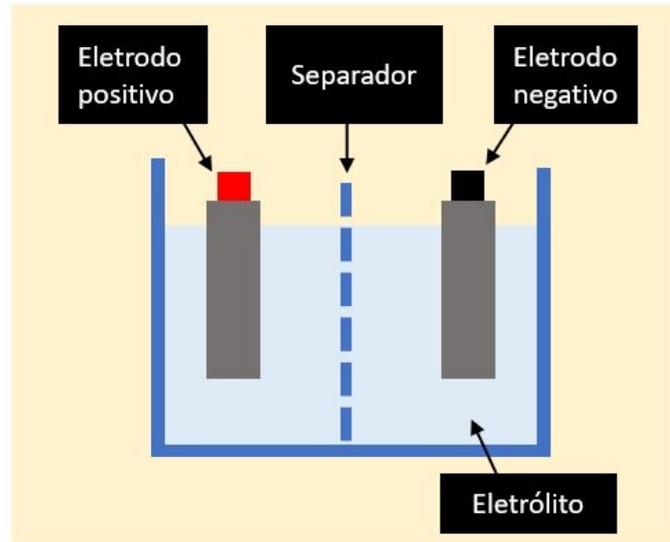
O Estado de Carga representa, de forma percentual, a capacidade em que a bateria se encontra. Portanto, através da ESR, podemos determinar a quantidade de energia armazenada na célula. Entretanto, à medida que a célula se desgasta, os valores de ESR tendem a aumentar, indicando uma redução no SoH que impacta diretamente no SoC. Em outras palavras, à medida que o SoH da célula piora, o SoC, que antes atingia a capacidade total da célula, passa a atingir um valor percentualmente menor.

Agora, vamos abordar a estrutura interna padrão das células. Toda bateria é formada por dois eletrodos: um positivo e outro negativo. O eletrodo positivo é o ponto que possui um potencial de oxidação-redução mais alto em relação ao eletrodo negativo, que, por sua vez, possui um potencial de oxidação-redução mais baixo. É importante observar que esses termos são mais comuns na literatura quando se trata de baterias secundárias; para baterias primárias encontramos os termos cátodo e ânodo, respectivamente, porém, não há nenhuma regra ou exigência quanto a isso.

Além dos eletrodos, uma bateria é composta por um eletrólito e um separador. O eletrólito é responsável por transferir os íons entre o negativo e o positivo da bateria, dependendo do processo (carga ou descarga), e o separador é uma membrana permeável cujo objetivo é evitar o contato físico entre o eletrodo positivo e o eletrodo negativo, impedindo assim curtos-circuitos internos. Ou seja, o separador evita que haja a circulação interna de corrente na célula. Os curtos-circuitos internos são frequentemente encontrados em baterias que não conseguem reter sua carga, apresentando grandes reduções nos níveis de tensão em pouco tempo.

A *Figura 2.4* tem como objetivo facilitar a compreensão desse assunto:

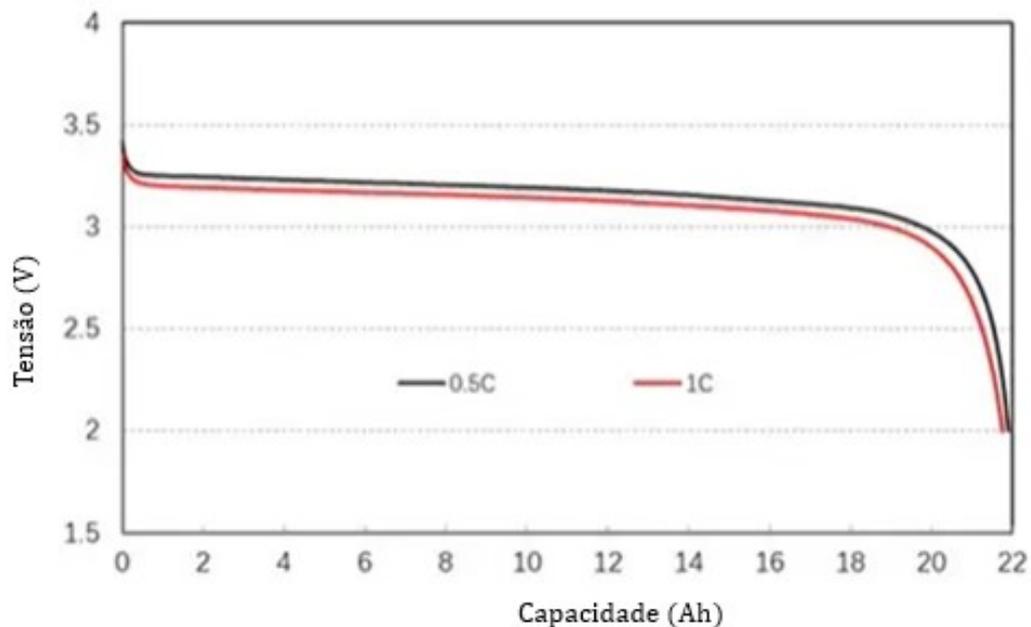
Figura 2.4 - Ilustração da estrutura padrão das baterias.



Fonte: (VILLALVA, 2021)

O próximo passo é compreender sobre os dois principais processos de uma bateria: os estados de carga e descarga. Durante a carga, a célula recebe energia de uma fonte externa, permitindo o armazenamento energético até que atinja sua capacidade total. Durante a descarga, a célula entrega energia para algum circuito externo até que sua energia máxima armazenada antes do início desse processo se esgote. Na *Figura 2.5* temos um exemplo do comportamento da tensão durante o processo de descarga:

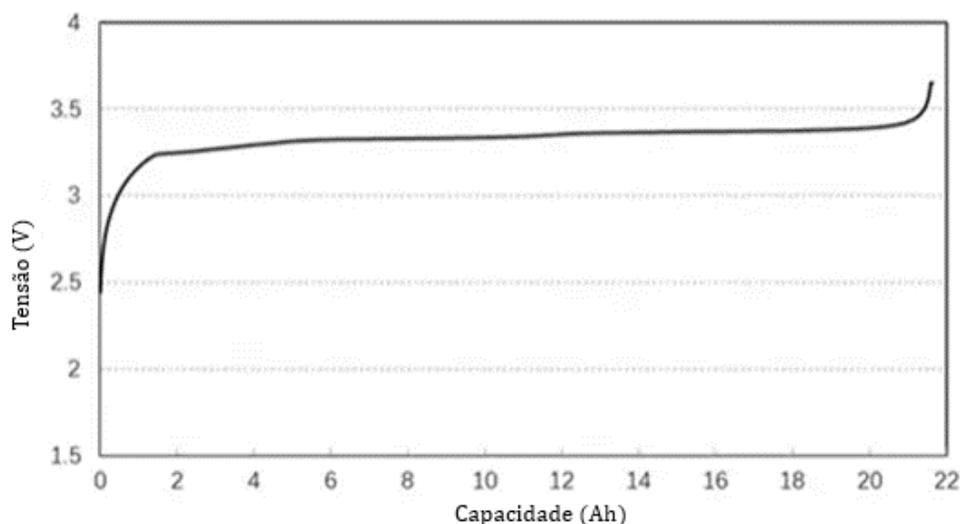
Figura 2.5 - Exemplo da curva característica de descarga de uma célula de li-íon.



Fonte: Editada de (EVLITHIUM)

Na *Figura 2.5*, podemos notar que a tensão não é constante, mas sim varia ao longo de uma faixa, conhecida como tensão de trabalho que vai desde o valor em carga máxima até o valor mínimo ao qual o fabricante recomenda que seja finalizado o processo. O maior valor de tensão é conhecido como tensão de carga máxima e o menor valor é chamado de tensão de corte, ou tensão mínima. Agora, na *Figura 2.6*, observa-se o comportamento da tensão durante o processo de carga:

Figura 2.6 - Exemplar da curva característica de carga de uma célula de li-íon.

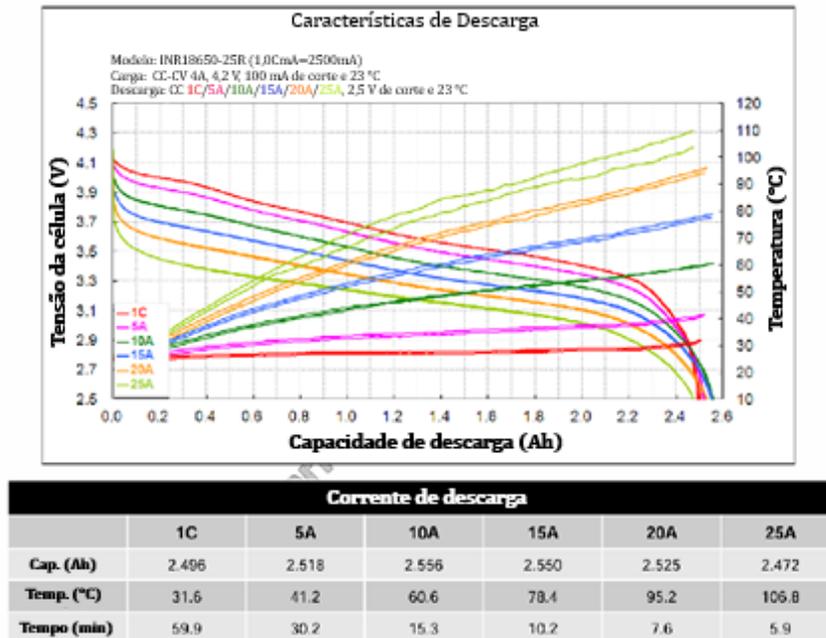


Fonte: Editada de (EVLITHIUM)

Na *Figura 2.6*, ocorre o processo inverso, a célula inicia-se no menor valor de tensão e vai até o máximo. Observando agora ambas as curvas, note que não há linearidade e nem constância, mas em um determinado momento a tensão se estabiliza, essa região é conhecida como faixa nominal, ou faixa plana, e nela obtemos a tensão nominal da célula.

Além disso, na *Figura 2.5*, podemos observar duas curvas, ambas buscando um valor próximo a 22 Ah, que representa a capacidade da célula. A capacidade é uma representação matemática da quantidade de carga que uma célula ou bateria pode armazenar. Outro detalhe é que cada curva representa a descarga em valores diferentes de corrente, expresso pelas taxas de 0,5C e 1C. Essa taxa, chamada de taxa-C, ou *C-rate*, do inglês, aponta o valor de corrente utilizado ao longo do processo em relação à sua capacidade nominal. Então, nesse exemplo, na curva em vermelho (de 1C) temos uma descarga de 22 A e na curva em preto (0,5C) temos uma descarga de 11 A. Essa taxa também pode ser utilizada em processos de carga. Um adendo: nem sempre a maior corrente de descarga significará uma menor capacidade atingida, como demonstra a *Figura 2.7*:

Figura 2.7 - Curva de descarga da célula INR 18650-25R em diferentes taxas-C.

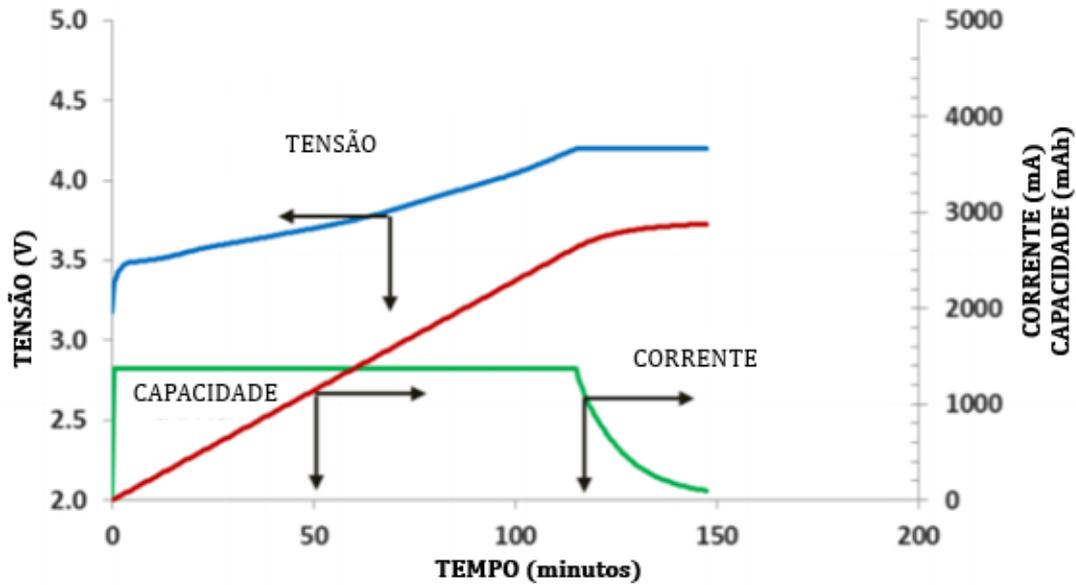


Fonte: Editada de (SAMSUNG SDI, 2013)

O modelo de célula da *Figura 2.7* tem capacidade de 2,5 Ah. Observa-se que com correntes de 10 A (ou 4C), 15 A (ou 6C) e 20 A (ou 8C), a capacidade atingida foi superior do que em 1C, por exemplo.

Quanto ao processo de carga, ele se dá início no que chamamos de carregamento em corrente constante (CC – *Constant Current*), didaticamente é quando uma fonte externa entrega um valor constante de corrente para a célula. Em condições normais, esse valor traz melhores performances quando aplicado a quantia padrão recomendada pelo fabricante. Durante esse primeiro processo, a tensão da célula vai aumentando à medida do tempo até que atingido um equilíbrio com a tensão entregue pela fonte dando fim a esse estágio. Em seguida, inicia-se um novo processo chamado de carregamento em tensão constante (CV – *Constant Voltage*), nele a tensão da fonte fica estável e a corrente entregue por ela passa a diminuir até que o carregamento seja concluído. O fim desse segundo estágio se dá quando é atingida a corrente de corte, que é diferente para cada modelo e pode ser encontrada nas folhas de dados do produto. A seguir, na *Figura 2.8*, podemos observar melhor o comportamento da tensão e corrente durante todo o processo de carga:

Figura 2.8 - Comportamento da tensão e corrente ao longo do tempo no processo de carga.



Fonte: Editada de (WOLLINGER, 2020)

Agora, na *Tabela 2.1*, encontramos os parâmetros mais comuns de uma folha de dados:

Tabela 2.1 - Parâmetros da célula Samsung INR 18650-25R.

Parâmetros	Especificações
[1]. Capacidade de descarga nominal	2500 mAh Carga: 1,25 A, 4,20 V, CCCV 125 mA de corte Descarga: 0,2C, 2,5 V de corte de descarga
[2]. Tensão nominal	3,6V
[3]. Carregamento padrão	CCCV, 1,25 A, 4,20 ± 0,05 V, 125 mA de corte
[4]. Carregamento rápido	CCCV, 4 A, 4,20 ± 0,05 V, 100 mA de corte
[5]. Tempo de carga	Carga padrão: 180min / 125 mA de corte Carga rápida: 60min (em 25°C) / 100 mA de corte
[6]. Descarga máxima contínua	20 A(em 25°C), 60% em 250 ciclos
[7]. Tensão de corte na descarga	2,5 V
[8]. Massa da célula	45,0g máxima
[9]. Dimensões da célula	Altura: 64,85 ± 0,15 mm Diâmetro: 18,33 ± 0,07 mm

[10]. Temperatura de operação (temperatura na superfície)	Carga: 0 a 50°C (liberação de recarga recomendada < 45°C) Descarga: -20 a 75°C (liberação de nova descarga recomendada < 60°C)	
[11]. Temperatura de armazenamento (recuperação de 90% após armazenar)	1,5 anos	-30~25°C
	3 meses	-30~45°C
	1 mês	-30~60°C

Fonte: (SAMSUNG SDI, 2014)

Observe que o termo [1] nos apresenta a capacidade nominal da célula, 2500 mAh, com os valores de carga e descarga padrões. Notamos que o carregamento padrão é de 1,25 A, a tensão máxima da célula é de 4,20 V e a corrente de corte é de 125 mA. Esses dados podem ser revisados em [3]. Enquanto isso, na descarga, verificamos que o valor padrão é de 0,2 C, equivalente a 500 mA, e a tensão mínima é de 2,5 V, informações que podem ser confirmadas em [7]. Em [2], encontramos a tensão nominal de 3,6 V.

Os termos [4] e [6] apresentam os valores máximos de corrente durante a carga e descarga, ou seja, são as correntes máximas recomendadas pelo fabricante para cada processo. É observado que a corrente de corte muda para o carregamento rápido, passando de 125 mA para 100 mA. Um detalhe relevante é que o fabricante indica que se a célula for descarregada na corrente máxima em cada ciclo, mantendo uma temperatura de 25 °C, ela perde 60% de sua capacidade nominal ao atingir o ciclo de número 250. O ciclo de vida de uma célula representa a quantidade de vezes em que ela pode ser carregada e descarregada profundamente (descarga profunda é quando a célula ultrapassa 80% da sua capacidade durante o processo).

Em [5], encontramos os tempos de carregamento, enquanto os termos [8] e [9] apresentam características estruturais da célula, como sua massa, altura e diâmetro. Já em [11], é fornecido o tempo de armazenamento máximo até que ocorra uma perda de 10% de sua capacidade, considerando as temperaturas às quais ela pode ser exposta. Portanto, não é recomendado um armazenamento prolongado da célula, pois ela tende a perder parte de sua capacidade. No entanto, se necessário, é aconselhável mantê-la dentro dos limites citados para evitar danos adicionais à sua saúde.

Por fim, em [10], temos as faixas de temperatura para cada operação: carga e descarga. Esses dados são fundamentais, pois caso sejam ultrapassados, a célula pode operar em sobretemperatura ou subtemperatura. Quando a bateria opera em temperaturas que excedem

seu limite máximo recomendado, pode ocorrer um descontrole térmico. Como o eletrólito e o separador são geralmente inflamáveis, há riscos de incêndio. Já quando a célula é exposta a uma temperatura inferior à recomendada pode sofrer degradações nos seus íons, reduzindo sua vida útil. Isso acontece porque em altas temperaturas ocorre desgaste em alguns íons, enquanto em baixas temperaturas há uma perda na eficiência de absorção, prejudicando a reação química. Além disso, em ambos os casos, a resistência interna aumenta, o que reduz sua capacidade.

A temperatura não é o único fator de risco de uma célula ou bateria; os cuidados durante os processos de carga e descarga também devem ser contínuos. Caso ocorra um estado de subcarga ou sobredescarga (nível de tensão durante a descarga inferior ao mínimo recomendado), temos uma perda significativa na vida útil da célula. Entretanto, se a célula estiver em estado de sobrecarga (quando o nível de tensão ultrapassa o máximo recomendado), os principais resultados são reações químicas colaterais que podem levar ao aumento da pressão interna e, se extrapolado em excesso, podem causar um efeito explosivo.

Alguns parâmetros da célula podem não ser encontrados nas folhas de dados, mas são bastante comuns no ramo. Entre eles, temos a energia específica (E_{esp}), densidade gravimétrica (d_{grav}), densidade volumétrica (d_{vol}) e densidade de potência (d_{pot}). Todos esses parâmetros podem ser identificados com base nas informações comuns apresentadas na folha de dados. A energia específica representa a quantidade de energia que a bateria pode armazenar e é medida em Wh. Sua fórmula pode ser encontrada na Eq. 2.1. A densidade gravimétrica é a relação entre a energia específica e a massa da bateria, expressa em Wh/u.m, sendo sua equação observada na Eq. 2.2. Por outro lado, a densidade volumétrica é a relação entre a energia específica e o volume da célula, medida em Wh/u.v, e seu cálculo pode ser feito utilizando a Eq. 2.3. Por fim, a densidade de potência é a relação da potência máxima entregue pela célula e sua massa. Utiliza-se a tensão nominal e a corrente máxima para calculá-la, sua unidade de medida é W/u.m, e podemos encontrá-la através da Eq. 2.4.

$$E_{esp} = V_{nom} \times Cap \quad 2.1$$

$$d_{grav} = \frac{E_{esp}}{m} \quad 2.2$$

$$d_{vol} = \frac{E_{esp}}{vol} \quad 2.3$$

$$d_{pot} = \frac{V_{nom} \times I_{máx}}{m} = \frac{P_{máx}}{m} \quad 2.4$$

Onde V_{nom} representa a tensão nominal, $I_{m\acute{a}x}$ é a corrente máxima de descarga da célula, Cap é a capacidade, m é a massa, vol é o volume e $P_{m\acute{a}x}$ é a potência máxima. Normalmente, a unidade de massa será a grama (g) ou o quilograma (kg), enquanto a unidade de volume será o litro (L), m^3 ou cm^3 , dependendo das dimensões do projeto. Em alguns casos, os autores podem tratar a energia específica como a densidade gravimétrica ou até mesmo chamá-la de densidade energética. Além disso, ao avaliar uma química, é comum trabalhar com a capacidade específica (mAh/g) e capacidade volumétrica (mAh/cm³) que os materiais podem atingir.

Após uma breve explicação dos diversos termos relacionados às baterias, podemos dar continuidade ao trabalho. Por mais que os exemplos sejam dos modelos de li-íon, de modo geral as informações se aplicam a todos os modelos, com exceção dos circuitos equivalentes e das curvas características, que tratam-se do perfil individual de cada tecnologia.

2.2 História das Baterias

Esse subtópico visa abordar de maneira geral a história da eletroquímica e como se deram os avanços no ramo de armazenamento de energia ao longo dos anos tanto para os modelos primários quanto para os modelos secundários de baterias.

2.2.1 A Primeira Bateria da História

Durante escavações arqueológicas em 1938, próximas a Bagdá, foi encontrado um material intrigante que chamou a atenção do diretor das escavações, Wilhelm Konig. O referido artefato compreende um conjunto de quatro recipientes, nos quais alguns continham cilindros de cobre e hastes de ferro. Com base em suas análises, Konig chegou à conclusão de que esses recipientes representavam uma bateria galvânica empregada pela antiga sociedade persa, datada aproximadamente entre os anos de 248 a.C. e 226 d.C. Existem diferentes perspectivas em relação à natureza do artefato. Enquanto alguns cientistas e pesquisadores acreditam se tratar de uma célula galvânica, outros defendem que esses recipientes poderiam ter sido utilizados para os mais diversificados fins, pois não há evidências que comprovem o conhecimento persa sobre armazenamento de energia (VON HANDORF; CROTTY, 2002). Devido às controvérsias, o artefato encontrado próximo a Bagdá é tratado como um mito, e a criação da primeira bateria é atribuída ao físico e químico Alexandre Volta, junto com o médico e físico Luigi Galvani (SCROSATI, 2011).

(FOCACCIA; RAFFAELLA, 2007) e (PICCOLINO, 1997) narram a trajetória da criação da primeira bateria da história. Ela teve início quando Galvani decide realizar experimentos em anfíbios por volta do século XVIII. Seu experimento consistia em conectar um fio de metal no canal vertebral, enquanto os nervos dos membros inferiores do animal ficavam expostos. Assim que os músculos contraíam, uma lanceta era interligada aos nervos, o que resultava na geração de uma faísca em uma máquina elétrica. Com base nos resultados obtidos após longos anos de testes, Galvani concluiu que havia uma energia específica nos animais e que os músculos detinham tal energia.

Volta demonstrou interesse nos experimentos de Galvani e decidiu iniciar estudos nessa área. Conforme seus testes avançavam, ele passou a questionar as conclusões de Galvani, pois em suas observações ele notou que as contrações musculares não exigiam um fluxo de corrente de dentro para fora do músculo.

Após dois séculos de estudos eletrofisiológicos, sabemos que Volta estava equivocado em grande parte de suas conclusões sobre a eletricidade animal. A eletricidade animal verdadeira está presente em todos os seres vivos e desempenha um papel fundamental em processos como a contração muscular e a condução nervosa, como Galvani supôs. Por outro lado, os experimentos de Volta redirecionaram sua pesquisa. Argumentando que a eletricidade poderia ser gerada pelo contato entre metais diferentes e alegando que os anfíbios reagiam a essa eletricidade da mesma forma que reagiam a outras formas de eletricidade externa. Com isso, ele foi em busca de provar o que ficou conhecido como “Teoria do Contato”.

Em 1800 Alexandre Volta envia uma descrição ao presidente da Royal Society de Londres de seu mais novo projeto, a pilha galvânica, que pode ser visto em (VOLTA, 1832). Tal elemento consistia em discos de prata e zinco, separados na interface zinco-prata por discos umedecidos de tecido ou papelão. Com isso, Volta provará sua “Teoria do Contato”, constatando que o fenômeno elétrico depende do contato de dois condutores diferentes. Portanto, seu projeto foi citado como a descoberta que eliminava a dúvida do galvanismo como um fenômeno elétrico (SUDDUTH, 1980).

A *Figura 2.9* representa uma ilustração da bateria de Volta:

Figura 2.9 - Exemplar da pilha de Alexandre Volta.



Fonte: (SCROSATI, 2011)

2.2.2 As Baterias Primárias

Após a descoberta de Volta, vários pesquisadores em diferentes partes do mundo empenharam-se em aprimorar a pilha voltaica. Entretanto, durante um período substancial, as pilhas eram consideradas equipamentos laboratoriais e não havia um amplo comércio devido à sua baixa eficiência. Embora alguns cientistas tenham proposto modelos de células recarregáveis logo após a popularização dos trabalhos de Volta, foi necessário um tempo significativo até que a primeira bateria recarregável efetiva fosse desenvolvida (BRENNI et al., 2012). Durante esse intervalo, os modelos químicos de baterias não-recarregáveis ganharam destaque e mantêm sua relevância até os dias atuais. Essas células, conhecidas como baterias primárias, serão abordadas neste tópico, explorando a história e química de alguns dos modelos mais importantes.

A bateria primária apresenta algumas vantagens, incluindo conveniência, simplicidade e facilidade de uso, uma vez que ela requer pouca ou nenhuma manutenção, permitindo uma operação descomplicada. A capacidade de dimensionar e moldar a bateria conforme a aplicação

é outra vantagem importante. Além disso, elas incluem boa vida útil, densidade de energia e potência significativas, confiabilidade e custo aceitável dentro de seus aspectos operacionais (LINDEN; REDDY, 2002).

Conforme mencionado anteriormente, as primeiras células apresentavam certa ineficiência, principalmente devido à polarização. Esta ocorria devido ao depósito de hidrogênio nas placas metálicas dos eletrodos. Como resultado, havia um aumento de resistência interna e uma força eletromotriz contrária, prejudicando a capacidade de fornecimento de corrente. Em resposta a essa questão, Antoine Bequerel propôs, em 1828, um modelo de célula não polarizante, porém não obteve sucesso.

Posteriormente, em 1836, John Daniell, baseando-se na ideia de Bequerel, conseguiu produzir uma bateria não polarizante, que ficaria conhecida como pilha de Daniell. Essa pilha consistia em dois líquidos: sulfato de zinco diluído e sulfato de cobre, separados por um vaso poroso em um recipiente. Seus eletrodos eram placas de zinco e cobre, respectivamente. Para a época, essa bateria demonstrou um desempenho satisfatório, sendo capaz de fornecer até 1,00 V. Logo, foi frequentemente utilizada como fonte de energia para campainhas e sistemas de telégrafo (BRENNI et al., 2012).

A pilha de Daniell representa um marco significativo ao abordar os principais desafios das pilhas voltaicas. No entanto, sua invenção envolvia o uso de dois eletrólitos diferentes, um para cada eletrodo. Além disso, a pilha de Daniell não conseguiu resolver completamente o problema da formação de depósitos de hidrogênio nas placas, uma vez que, à medida que o sulfato de cobre perdia concentração, o hidrogênio era capaz de se infiltrar na reação (BARAK, 1966).

Outra vez, os pesquisadores foram em buscas de novas soluções. Os principais objetivos eram reduzir ainda mais os efeitos da polarização e produzir uma célula que tivesse apenas um eletrólito. Dessa vez, o sucesso foi obtido pelos estudos do famoso engenheiro químico Georges Leclanché.

Por volta de 1866, Leclanché desenvolveu uma bateria com base em carbono e zinco, na qual também havia dióxido de manganês, um material despolarizante. Além disso, ele desenvolveu um método de vedação que permitia um transporte fácil do recipiente (BRENNI et al., 2012). Sua estrutura pode ser observada na *Figura 2.10*.

Figura 2.10 - Bateria de Leclanché.



Fonte: (BARAK, 1966)

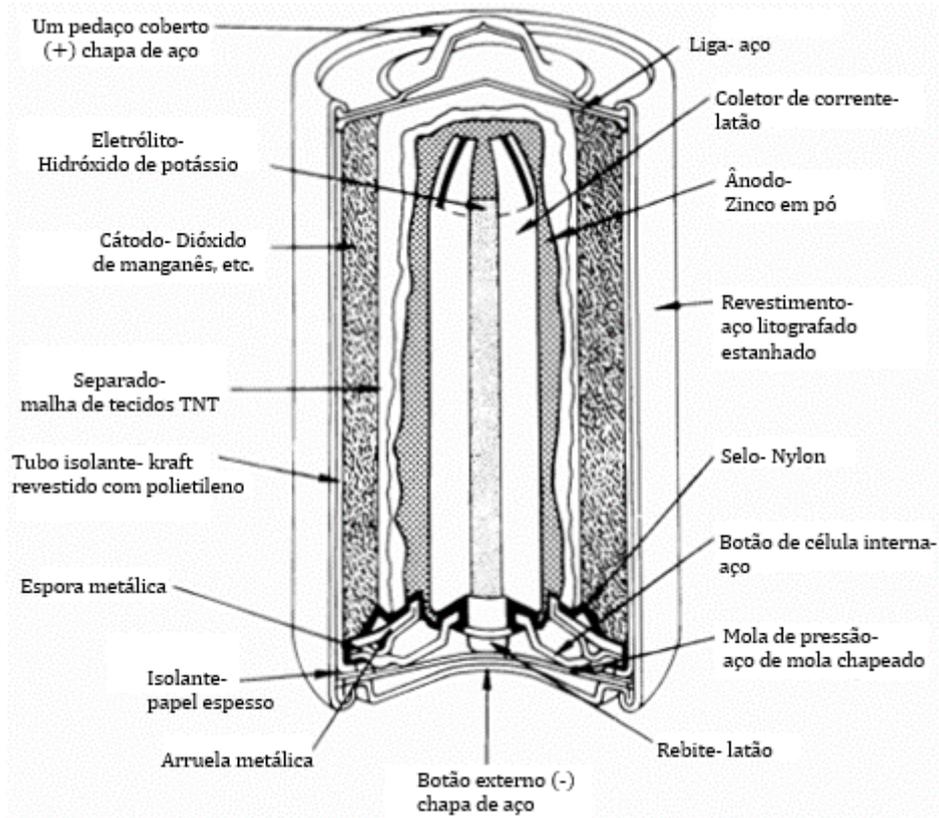
Portanto, uma barra de zinco fundida foi utilizada como ânodo, enquanto o carbono em pó misturado com o dióxido de manganês era utilizado como cátodo. Além disso, a bateria de Leclanché continha uma solução de cloreto de amônio como único eletrólito (BARAK, 1966). Como demonstrado na *Figura 2.10*, a bateria consistia em um frasco onde o eletrólito, o eletrodo negativo e um vaso poroso eram adicionados. Dentro do vaso, situava-se o eletrodo positivo.

A bateria de Leclanché representou uma solução significativa para os principais desafios das baterias primárias e foi amplamente utilizada em sistemas de telégrafo na época. Além disso, avanços significativos na tecnologia das baterias de zinco-carbono permitiram que elas mantivessem sua relevância até os dias atuais. No entanto, apesar de sua conveniência, essa tecnologia tem perdido espaço no mercado das baterias não-recarregáveis para os modelos químicos mais modernos, como os de lítio, que oferecem vantagens superiores em desempenho.

Após o desenvolvimento da bateria de Leclanché, houve uma série de avanços no armazenamento de energia de baterias primárias até a era do lítio. Dentre esses avanços, destaca-se a criação das baterias alcalinas. As baterias alcalinas foram produzidas em diferentes

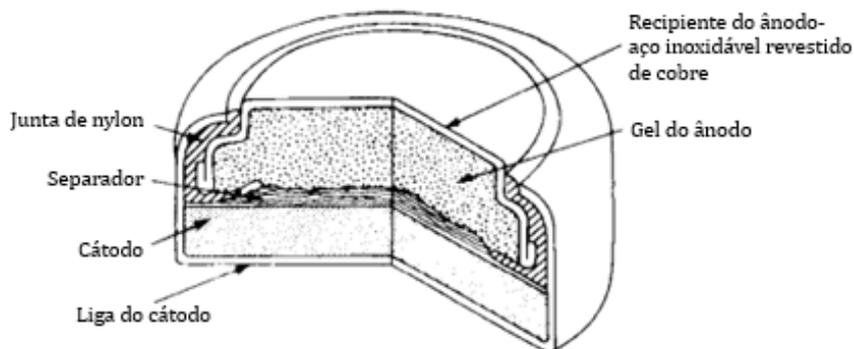
formulações químicas, como zinco-dióxido de manganês, conforme visto em (DE SOUZA; TENÓRIO, 2004), e zinco-ar, como mostrado em (CHAKKARAVARTHY; WAHEED; UDUPA, 1981). Essas baterias apresentavam, em média, uma tensão nominal de 1,5 V, podendo variar ligeiramente dependendo da pureza dos materiais utilizados. Além disso, as baterias alcalinas eram construídas em novos formatos: cilíndricos e botões, apresentados nas ilustrações abaixo, *Figura 2.11 e Figura 2.12*:

Figura 2.11 - Corte da bateria alcalina cilíndrica de zinco-dióxido de manganês.



Fonte: Editada de (LINDEN; REDDY, 2002)

Figura 2.12 - Corte da bateria de botão de zinco-dióxido de manganês.



Fonte: Editada de (LINDEN; REDDY, 2002)

Desde a década de 1990, as baterias de íons de lítio, também conhecidas como baterias de li-íon, têm conquistado um mercado significativo. De fato, a alta densidade energética das baterias de lítio confere a essa tecnologia uma vantagem competitiva em relação a outras opções disponíveis (LISBONA; SNEE, 2011). Essa afirmação contempla tanto as baterias primárias quanto as baterias secundárias, como veremos mais adiante.

Além da densidade energética, as baterias primárias de li-íon também conferem maior tensão, maior faixa de operação térmica, maior densidade de potência, maior vida útil e um perfil de curva característica mais plana. Apesar de tantas vantagens, assim que foram lançadas, em 1970, essas baterias não conquistaram grande mercado devido ao seu alto custo e aos seus riscos. Ao longo dos anos, novas fórmulas foram desenvolvidas, atingindo um padrão mais estável de segurança e com um custo-benefício atrativo (LINDEN; REDDY, 2002).

Outro ponto muito atrativo das baterias de lítio é que esse metal ainda tem grandes reservas e pode acompanhar o crescimento por longas datas (GRADY, 1980). Alguns dos principais modelos químicos para as baterias de íons de lítio primárias foram: Lítio dióxido de enxofre (LiSO_2), Lítio cloreto de tionila (LiSOCl_2), Lítio cloreto de sulfurila (LiSO_2Cl_2), Lítio dióxido de manganês (LiMnO_2), Lítio dissulfeto ferroso (LiFeS_2) e Lítio óxido de cobre (LiCuO).

As características desses modelos podem ser encontradas em (XING et al., 2014), (C. SCHLAIKJER; GOEBEL; MARINČIĆ, 1979), (HALL; KOCH, 1982), (PARK; YOON, 2003), (SHAO-HORN; OSMIALOWSKI; HORN, 2002), (MARINČIĆ, 1976) e (LINDEN; REDDY, 2002). Ao longo dos próximos parágrafos, vamos abordar as informações contidas nessas referências para apresentar as características dos modelos citados.

Primeiramente, vamos abordar os modelos que não foram comercializados, mas tiveram participações importantes no âmbito militar, são eles: LiSO_2 , LiSOCl_2 e LiSO_2Cl_2 . A bateria de LiSO_2 contempla uma boa densidade energética e uma tensão nominal de 3,1 V, superior às apresentadas pelos modelos alcalinos. A bateria de LiSOCl_2 possui uma tensão nominal de aproximadamente 3,65 V, maior densidade energética e maior densidade de potência em relação à anterior. Apesar da vantagem, a bateria com cloreto de tionila apresentava certos riscos, então a LiSO_2Cl_2 veio para intermediar uma maior segurança, renunciando um pouco de densidade energética. Esses modelos eram conhecidos por seus cátodos solúveis, ou seja, constituídos de líquidos ou gases.

A primeira bateria de lítio primária comercializada foi a LiMnO_2 . Esse modelo tem como característica uma baixa corrente de descarga, mas uma boa taxa de capacidade, tensão nominal de 3,0 V, além de ter maior segurança em relação aos modelos militares, algo

fundamental para a comercialização. Enquanto isso, a bateria de LiFeS_2 apresenta uma capacidade de fornecimento de potência maior e um bom desempenho em temperaturas mais baixas, mas sua tensão é de 1,5 V. Já a tecnologia de LiCuO contém uma maior energia específica em relação ao modelo com dióxido de manganês, mas uma densidade energética e gravimétrica abaixo do modelo de dissulfeto ferroso, e sua tensão nominal também é de 1,5 V. Esses modelos são conhecidos por conter cátodos sólidos.

2.2.3 *As Baterias Secundárias*

Após a descoberta de Volta, diversos pesquisadores concentraram seus estudos em busca de desenvolver uma bateria que fosse recarregável. Em 1869, Gaston Planté, um cientista francês, produziu aquela que seria a primeira bateria secundária da história capaz de ser utilizada comercialmente. Tal bateria contava com um ânodo de chumbo esponjoso e um cátodo de dióxido de chumbo, ambos submergidos em um eletrólito de solução de ácido sulfúrico, assim se deu início à bateria de chumbo-ácido (Pb-ácido) (JAFARI; RAHIMPOUR, 2020).

Apesar de ser considerado obsoleto, o modelo de chumbo-ácido é bastante robusto e ainda é encontrado em diversas aplicações atuais, como na partida em automóveis, no fornecimento de energia para sistemas de emergência e na partida em motores à diesel, entre outras. Isso se deve aos vários avanços conquistados pela evolução da tecnologia. Ao longo dos anos, novas técnicas de fabricação foram fundamentais para o desenvolvimento de baterias com óxidos de chumbos mais refinados e para o aperfeiçoamento na construção química, com conexões intercelulares mais curtas, resultando em melhorias tanto no armazenamento de energia quanto na vida útil, aumentando os ciclos de vida (RUETSCHI, 1977).

Alguns anos após o desenvolvimento da bateria de chumbo-ácido proposta por Planté, um engenheiro e inventor sueco, Waldemar Jungner, produziu, em 1899, a bateria de Níquel-Cadmio (Ni-Cd) (BLOMGREN, 2019). Porém, essa tecnologia ampliou suas aplicações apenas em 1961, quando a Sanyo Electric Co. voltou sua atenção para esse modelo químico, aprimorando a célula de Ni-Cd selada desenvolvida por Neumann em 1946. Como resultado, obteve-se uma performance com melhor equilíbrio entre sobrecarga e descarga excessiva (JEYASEELAN et al., 2020).

As principais características do modelo de Ni-Cd e suas aplicações são encontradas em (JEYASEELAN et al., 2020) e (PUTOIS, 1995). Sua boa densidade energética, alto número de ciclos de recarga e bom custo tornam-na ideal para uso em equipamentos de pequeno porte (se

comparado com o modelo de Pb-ácido), como barbeadores, lanternas, celulares e brinquedos. Porém, as células de Ni-Cd tem o efeito memória e são mais agressivas ao meio ambiente.

Dados os problemas das baterias de Ni-Cd, uma nova tecnologia foi impulsionada: o Níquel-Hidreto Metálico (Ni-MH). Além de mitigar os problemas citados, esse modelo obtém vantagens tanto na sua densidade energética quanto na densidade de potência, sendo uma química que possibilitou a substituição de várias células primárias em equipamentos eletrônicos por baterias agora recarregáveis de Ni-MH, como as câmeras digitais. No entanto, ela detém um menor ciclo de vida do que o tradicional Ni-Cd (FETCENKO et al., 2007).

Então, o forte desejo por uma evolução nos meios de armazenamento de energia tornou-se significativamente tangível, e a necessidade de uma bateria recarregável de alta performance para uso em aparelhos eletrônicos trouxe a bateria recarregável de íons de lítio. A primeira bateria de lítio foi desenvolvida em 1970 por Michael Stanley, que utilizou lítio metálico e sulfeto de titânio como eletrodos. O modelo proposto por Stanley não foi efetivo para uso prático, e apenas em 1991 houve o avanço necessário para uma viabilização comercial (ZUBI et al., 2018). Além disso, as preocupações ambientais fizeram com que, a partir de 2010, aumentassem as pesquisas em busca de aprimorar a tecnologia das baterias de lítio (LI et al., 2018), para que, assim, o mercado de VHEs e BEVs pudesse competir com os tradicionais veículos a combustão.

Algumas características de comparação entre os modelos secundários podem ser observadas na *Tabela 2.2*:

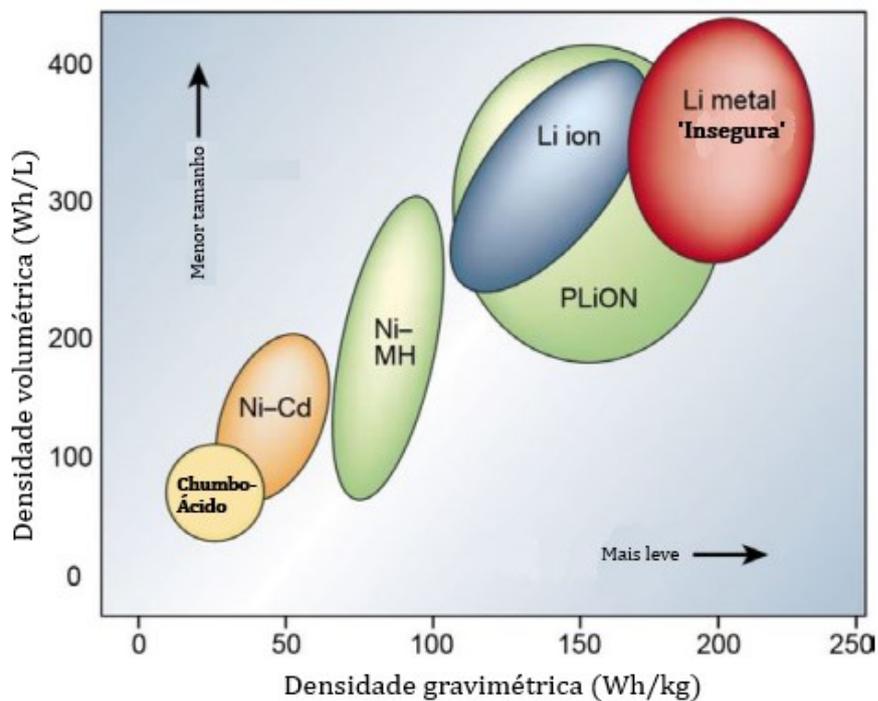
Tabela 2.2 - Dados de comparação entre os modelos de baterias secundárias.

Especificação	Pb-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-íon
Ciclos de vida	200~300	1000	300~500	500~2000
Resistência interna	Muito Baixa	Muito Baixa	Baixa	Varia com a química
Tensão Nominal (V)	2	1,2	1,2	3,2~3,7
Faixa de temperatura (°C)	-20~50	-20~65	-20~65	-20~60
Toxicidade	Muito Alta	Muito Alta	Baixa	Baixa
Custo	Baixo	Moderado	Moderado	Alto

Fonte: Editada de (BATTERY UNIVERSITY, 2021)

A principal vantagem do lítio em relação aos outros modelos secundários está na sua energia específica, pois tanto sua densidade gravimétrica quanto sua densidade volumétrica é superior, como mostra um comparativo na *Figura 2.13*:

Figura 2.13 - Comparativo da densidade energética das baterias secundárias.



Fonte: Editada de (DENG, 2015)

Durante o processo de carga os íons de lítio se movem do eletrodo positivo para o negativo e durante a descarga ocorre o inverso. As baterias de lítio secundárias são classificadas a partir do material doador dos íons de lítio, esses materiais que são os principais determinantes das características das células (ZUBI et al., 2018).

A investigação contínua em busca de materiais capazes de efetuar o transporte dos íons de lítio tem perdurado até os dias atuais, resultando em uma diversidade de modelos químicos de baterias baseadas nessa tecnologia. Entre eles, destacam-se as químicas de lítio com óxido de cobalto (LiCoO_2), óxidos de níquel, cobalto e manganês ($\text{Li}[\text{NiCoMn}]\text{O}_2$), óxidos de níquel, cobalto e alumínio ($\text{Li}[\text{NiCoAl}]\text{O}_2$), ferro fosfato (LiFePO_4), entre outros (SCHIPPER; AURBACH, 2016). Cada uma dessas abordagens tecnológicas apresenta suas próprias vantagens e limitações. No tópico subsequente, serão abordadas as baterias de íon de lítio mais profundamente, permitindo uma análise mais minuciosa e específica.

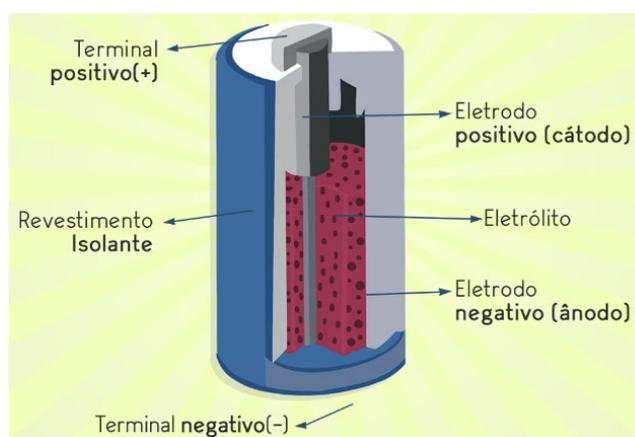
2.3 A Tecnologia das Baterias de Íons de Lítio

O uso de lítio nas baterias recarregáveis foi um avanço considerável para o armazenamento de energia, porém, essa tecnologia não traz consigo um salto apenas na energia específica. Diversos estudos resultaram em diferentes modelagens químicas para a composição dos cátodos. Cada modelo químico envolvendo as células de lítio tem suas vantagens e desvantagens, podendo então ampliar o mercado para aplicações dos mais variados tipos, seja necessário maior densidade energética, densidade de potência ou suporte para um maiores ciclos de carga e descarga.

Além disso, as células das baterias de íons de lítio podem ser produzidas em diferentes estruturas: cilíndricas, prismáticas e *pouch* (ou bolsa). Cada modelo pode apresentar condições diferentes, mesmo se a química for a mesma. Isso ocorre porque o formato necessita de uma quantidade diferente dos materiais de revestimento e devido aos efeitos térmicos serem distintos para cada estrutura. As principais variações na performance são na densidade de potência e ciclo de vida (BRIDGEWATER et al., 2021) (KIM; CHOI; LEE, 2019).

As células cilíndricas são semelhantes àquela apresentada na *Figura 2.11*. Porém, para os modelos de lítio recarregáveis, temos pilhas de tamanhos maiores do que os modelos alcalinos, como os projetos de 18650 e 21700. Podemos observar seu modelo na *Figura 2.14*:

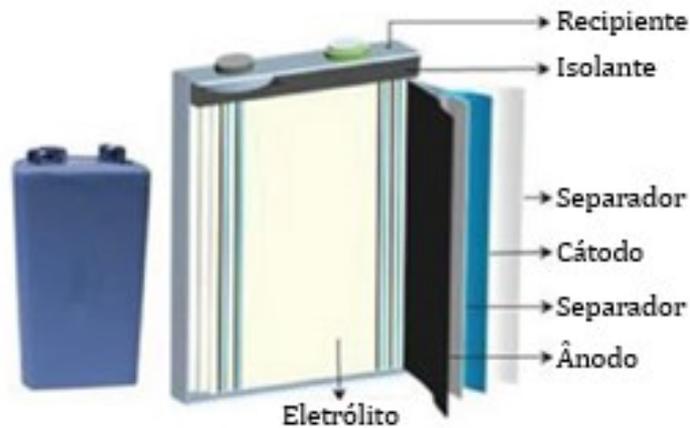
Figura 2.14 - Célula cilíndrica de li-íon.



Fonte: (TANAKA DOS SANTOS)

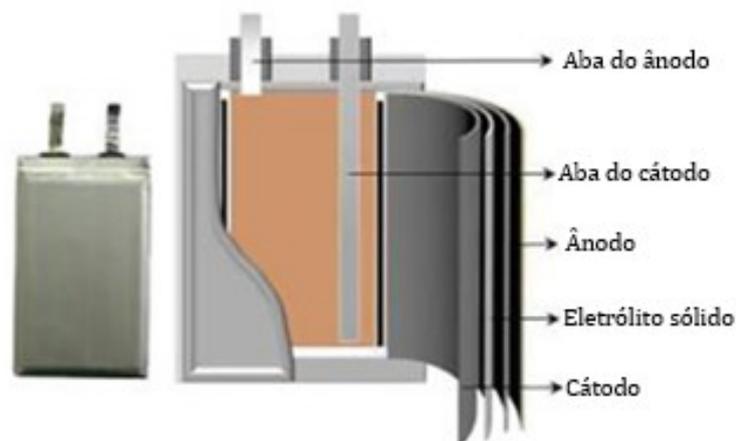
As células prismática e *pouch* são produzidas em tamanhos mais diversificados do que a cilíndrica. A *Figura 2.15* apresenta o modelo prismático e a *Figura 2.16* o modelo *pouch*:

Figura 2.15 - Célula prismática de li-íon.



Fonte: Editada de (SHEPARD, 2022)

Figura 2.16 - Célula pouch de li-íon.



Fonte: Editada de (SHEPARD, 2022)

A estrutura e as dimensões podem trazer diferenças no preço por densidade energética, uma vez que a construção química desses modelos pode ser alterada.

Os principais parâmetros de uma bateria li-íon são: potência específica, energia específica, segurança, performance, vida útil (ou durabilidade), custo, taxa-C e estabilidade térmica. A seguir, vamos separar quimicamente os modelos Lítio Cobalto Óxido (LCO), Lítio Ferro Fosfato (LFP), Lítio Níquel Cobalto Alumínio (NCA) e Lítio Níquel Manganês Cobalto (NMC ou NCM) e discorrer sobre suas histórias, principais características e aplicações com base em (ZUBI et al., 2018), (SCHIPPER; AURBACH, 2016), (NITTA et al., 2015) e (ZHANG et al., 2018).

2.3.1 Lítio Cobalto Óxido (LCO)

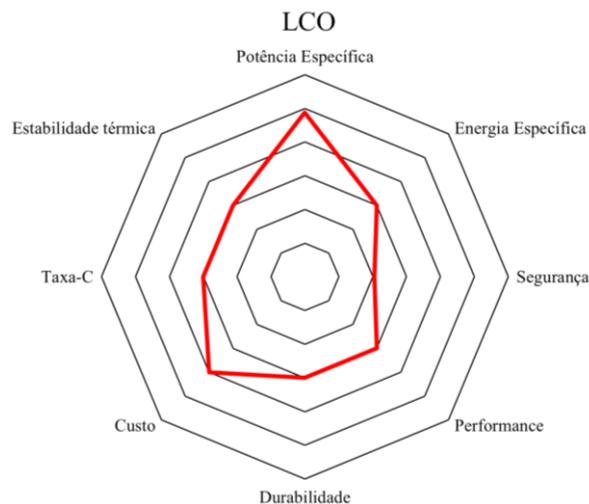
A primeira bateria secundária de íons de lítio a entrar no cenário comercial foi a bateria de lítio com óxido de cobalto (LiCoO_2), ou LCO. Esta realização, marcando o início da era das baterias de lítio, foi facilitada pela descoberta da estabilidade do grafite como ânodo, um avanço que só ocorreu em 1991. No entanto, o potencial do óxido de cobalto como um material promissor para acompanhar o lítio já havia sido identificado desde 1980, por Goodenough.

A tecnologia LCO detém uma capacidade específica de 145 mAh/g e uma capacidade volumétrica de 550 mAh/cm³. Além disso, esse modelo contém uma densidade gravimétrica de até 200 Wh/kg, bom desempenho até os 1000 ciclos, tensão nominal entre 3,7 V e 3,9 V e estabilidade térmica até os 150 °C.

Os principais pontos fracos desse modelo são a sua baixa estabilidade térmica, alto custo e rápida perda de capacidade em correntes mais elevadas e ciclos profundos. Em comparação com outros modelos de li-íon, este fica abaixo, mas, por ser o primeiro, conquistou espaço no mercado de dispositivos portáteis devido à sua capacidade volumétrica e ciclo de vida consideravelmente superiores aos de outros modelos químicos de baterias da época.

Portanto, a baixa segurança fez com que o LCO perdesse mercado para os demais modelos de lítio no setor de eletroportáteis, principalmente o NMC e o NCA. Além disso, devido à sua baixa energia específica e alto custo, esse modelo não é cogitado para o uso em BEVs e HEVs. A tecnologia LCO é definida graficamente na *Figura 2.17* com os seguintes pontos:

Figura 2.17 - Gráfico teia das baterias LCO.



Fonte: Editada de (ZHANG et al., 2018).

2.3.2 Lítio Ferro Fosfato (LFP)

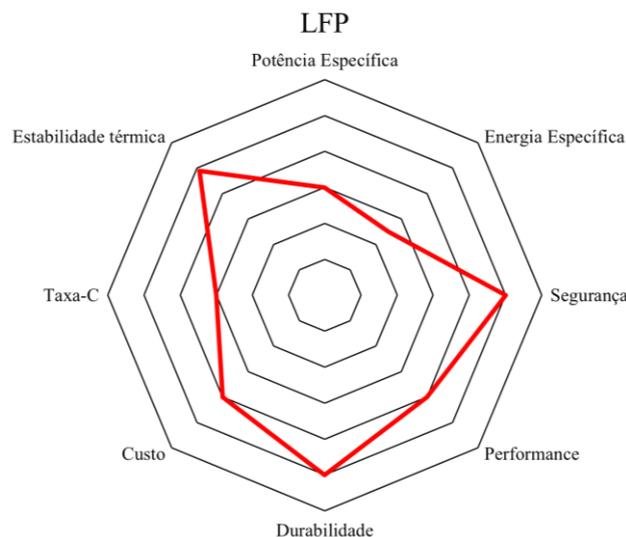
Em 1991, uma química promissora começou a ganhar espaço nas pesquisas de materiais para acompanhar o lítio. No entanto, apenas em 1997 que Goodenough conseguiu desenvolver uma estrutura de ligação capaz de obter bons desempenhos. Dessa forma, deu-se início ao modelo de lítio ferro fosfato (LiFePO_4), chamado de LFP, que, assim como o modelo LCO, possui o grafite como eletrodo positivo. Sua comercialização só ocorreu em 1999.

Esse modelo apresenta uma capacidade específica de 165 mAh/g e uma capacidade volumétrica de 589 mAh/cm³. Sua densidade gravimétrica pode alcançar baixos 130 Wh/kg, muito disso devido à sua tensão nominal entre 3,2 V e 3,3 V, mas ela detém um bom desempenho até os 2000 ciclos e estabilidade térmica de até incríveis 270 °C.

Os principais pontos desse modelo são sua excelente estabilidade térmica e boa durabilidade. Além disso, apresenta boa constância dentro de seu valor nominal, ou seja, uma faixa de tensão mais estável, o que garante um desempenho constante na maior parte do tempo, algo importante dependendo da aplicação.

Assim, a bateria LFP é amplamente utilizada em sistemas de fornecimento de energia, como os sistemas *off-grid* e bancos de baterias em sistemas de geração de energia solar e eólica. Sua dominância nesse setor se deve ao seu desempenho constante e durabilidade. Sua baixa energia específica fez com que esse modelo não seja o mais usual em BEVs e HEVs, embora encontremos alguns exemplares com essa química, como o BYD E6. Essa bateria é definida graficamente na *Figura 2.18* com os seguintes pontos:

Figura 2.18 - Gráfico teia da bateria LFP.



Fonte: Editada de (ZHANG et al., 2018)

2.3.3 Níquel Cobalto Alumínio (NCA)

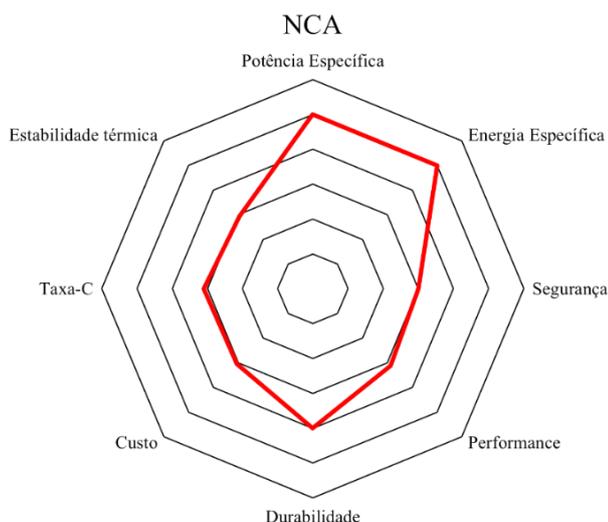
Em 1999, as baterias LFP não foram as únicas a entrar no mercado. Os materiais que acompanham o lítio agora são os óxidos de níquel, cobalto e alumínio (LiNiCoAl), ou NCA. Um ponto importante é que esse modelo pode ser subdividido em outros, dependendo da distribuição química dos materiais. Alguns dos modelos de NCA encontrados são: $\text{Li}[\text{Ni}_{0,84}\text{Co}_{0,12}\text{Al}_{0,04}]\text{O}_2$, o $\text{Li}[\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,16}\text{Al}_{0,04}]\text{O}_2$ e o $\text{Li}[\text{Ni}_{0,95}\text{Co}_{0,04}\text{Al}_{0,01}]\text{O}_2$. Como forma de distinguir, usa-se o número de íons de níquel após a sigla padrão. Tendo os modelos acima como exemplos, encontramos o NCA84, NCA80 e o NCA95 (PARK et al., 2019). Essa variação busca encontrar um enriquecimento de níquel mantendo uma boa estabilidade química, aumentando assim a energia específica que a composição pode atingir. Seu ânodo é de grafite, também.

Sua capacidade específica atinge valores de 200 mAh/g, enquanto a capacidade volumétrica pode atingir 700 mAh/cm³. Além disso, temos uma densidade gravimétrica de até 260 Wh/kg, tensão nominal entre 3,6 V e 3,65 V, duração de 500 ciclos e estabilidade térmica em até 150 °C.

Dentre os demais modelos de lítio, este é o que possui a maior energia específica, acompanhada de outra boa característica, que é a alta potência específica. Como mencionado, essa química dispõe da possibilidade de alteração na quantidade de materiais, aumentando as possibilidades de aplicações para esse modelo. Com algumas distribuições, podemos obter melhor estabilidade térmica, abrindo mão um pouco da energia, resultando em uma combinação mais segura e duradoura. Por outro lado, podemos renunciar alguns pontos em segurança para melhorar a capacidade. Enfim, existem diversas versões, sendo que algumas se destacam para determinadas aplicações e outras nem tanto.

Devido às suas características, principalmente sua energia específica, a química NCA é bastante utilizada em BEVs e HEVs, sendo inclusive o modelo escolhido pela Tesla. Como citado anteriormente, com a perda de mercado das baterias LCO, a NCA tem sido utilizada em alguns aparelhos eletroportáteis. Gráficamente, podemos definir essa química com as características apresentadas na *Figura 2.19*:

Figura 2.19 - Gráfico teia da bateria NCA.



Fonte: Editada de (ZHANG et al., 2018)

2.3.4 Níquel Manganês Cobalto (NMC)

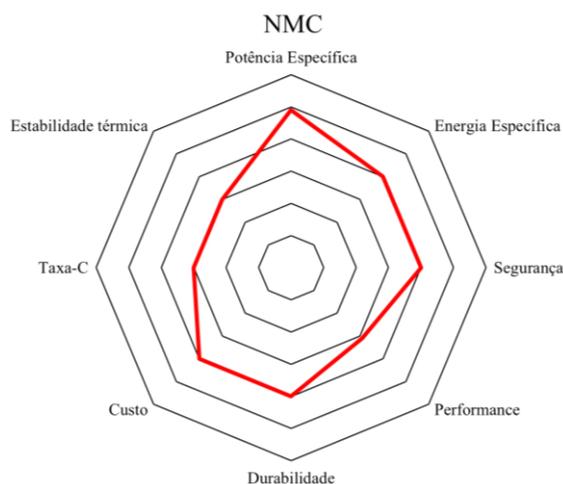
Em 2004, surge uma nova química promissora para o acompanhamento do lítio no cátodo, desta vez usando óxidos de níquel, manganês e cobalto (LiNiMnCo). Esse modelo é conhecido como NMC ou NCM, e assim como os outros, também contém um ânodo de grafite. Similarmente à NCA, esse modelo pode ser subdividido de acordo com a distribuição de seus materiais, sendo alguns deles o $\text{Li}[\text{Ni}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}]\text{O}_2$, o $\text{Li}[\text{Ni}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}]\text{O}_2$ e o $\text{Li}[\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}]\text{O}_2$. Desta vez, a nomenclatura recebe o valor de cada material após a sigla padrão, logo, NMC333, NMC622 e NMC811, respectivamente. Cada material possui características específicas: o níquel está associado à capacidade, o cobalto à durabilidade e potência, e o manganês à segurança e redução de custos.

A capacidade específica desse modelo é de 170 mAh/g e a capacidade volumétrica é de 600 mAh/cm³. Ele possui uma tensão nominal de 3,7 V, densidade gravimétrica até 220 Wh/kg, durabilidade máxima de 2000 ciclos e estabilidade térmica até 210 °C. A química NMC é a mais consistente, considerando todos os aspectos, com boa energia específica, potência específica, durabilidade e estabilidade térmica. Obviamente, em caso de enriquecimento de níquel, abrimos mão um pouco da segurança e durabilidade em prol de mais capacidade, por exemplo. Então, assim como o NCA, esse modelo pode ser fabricado de modo a ser útil para diversas aplicações.

Diante do que foi apresentado, podemos compreender o motivo pelo qual esse modelo domina o mercado de BEVs e HEVs. Com essa química, é possível obter alta autonomia e

segurança sem comprometer uma boa durabilidade, características fundamentais para essa aplicação. Além disso, esse modelo abrange boas características para ser utilizado em aparelhos eletrônicos e vem ganhando espaço nesse setor cada vez mais. Na *Figura 2.20* podemos observar graficamente suas características:

Figura 2.20 - Gráfico teia da bateria NMC.



Fonte: Editada de (ZHANG et al., 2018).

2.3.5 Demais Químicas e Modelos

Além dos modelos apresentados anteriormente, temos outras químicas que não foram tão marcantes ou que ainda não ganharam seu espaço. Entre elas, destacam-se os modelos Lítio com Óxido de Manganês (LMO ou LiMnO_2) e Lítio com Óxido de Titanato (LTO ou LiTiO_2). O modelo LMO teve como objetivo substituir o LCO, mas não foi suficiente para isso, sendo superior apenas em estabilidade térmica. Durante alguns anos, houve células que continham parte de LMO e NMC, com o intuito de aprimorar alguns parâmetros da tecnologia de NMC. No entanto, com o próprio avanço da química NMC, essa junção foi abandonada. Enquanto isso, o LTO é um modelo bastante diferente dos demais, já que o LTO atua como ânodo e não como cátodo. Para o cátodo da LTO, encontramos as químicas de LMO e a NCA. O grande problema desse modelo é sua baixíssima energia específica; por outro lado, ele possui uma excelente durabilidade.

Uma informação relevante a ser mencionada é sobre os modelos conhecidos como Li-Po: eles utilizam um polímero de lítio macio ao invés do lítio intercalado e um eletrólito de grafite sólido ao invés de líquido. Apesar disso, os materiais que acompanham o Li são os mesmos já citados. Em outras palavras, o modelo Li-Po nada mais é que uma variante dos

modelos Li-íon, desenvolvida para células *pouch* ultrafinas e leves voltadas para as aplicações em eletroportáteis, como os aparelhos telefônicos, notebooks, entre outros. No entanto, em troca dessa redução de tamanho e peso, esses modelos têm uma redução em sua durabilidade e um aumento no custo.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

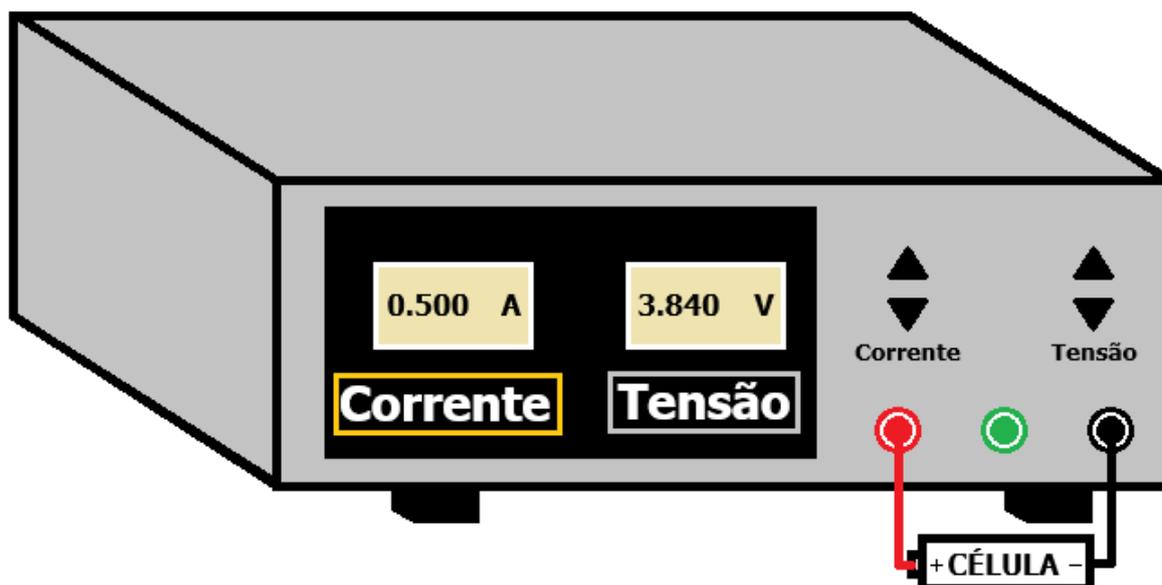
Com o progresso contínuo no campo do armazenamento eletroquímico e a expansão notável da adoção de veículos elétricos em várias nações, observou-se um crescimento substancial em âmbito nacional, conforme aponta a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE) em (ABVE, 2023). Além disso, houve um aumento considerável no desenvolvimento de projetos de extensão focados em veículos elétricos em diversas universidades distribuídas pelo território nacional. Essas iniciativas visam participar de competições tanto em escala nacional quanto internacional, incluindo eventos notáveis como o Fórmula SAE-E e o MotoStudent.

Com o passar dos anos, é aguardado um crescimento considerável desse mercado, impulsionando a internalização dos processos de assistência técnica em células e baterias. Isso decorre da inviabilidade financeira de submeter esses processos à China, que é a grande referência nesse campo e principal fornecedora, ou a outros países. Além disso, as equipes universitárias devem começar a produzir as próprias baterias nos laboratórios, realizando a compra das células e dos demais insumos. Isso permite testes nas células, aprimorando e credibilizando ainda mais os relatórios exigidos pelas competições. Dito isso, equipamentos que buscam realizar os processos de carga, testes de descarga, encontrar curvas características e realizar testes de ESR serão cada vez mais comuns nas bancadas.

No Capítulo 2.1, vimos que o processo de carga é realizado em duas etapas: o CC e o CV. Além disso, foi mencionado que na folha de dados podemos encontrar os valores de corrente de carga (padrão e máxima) e tensão de carga máxima. Esses dados nos permite realizar o carregamento de uma célula de forma adequada e segura, de acordo com o fornecedor. Vale ressaltar que o carregamento com corrente acima do valor máximo pode reduzir sua vida útil e carregamento com tensão superior pode resultar no estado de sobretensão, causando danos químicos e até físicos na célula.

Para efetuar o carregamento de uma célula, é necessário conectá-la em paralelo a uma fonte de energia, conforme mostrado na *Figura 3.1*. No mercado, diversas fontes de bancada controladas estão disponíveis, tais como os modelos SPS3010 da NICE-POWER e K3010D da TOPSHARK, entre outros. Todos os modelos citados fornecem até 30 V e 10 A em suas saídas, permitindo conexões em série e em paralelo.

Figura 3.1 - Ilustração de um carregamento de uma célula de li-íon.



Fonte: Autor.

Embora o uso de fontes de bancada represente uma abordagem eficaz para carregar uma célula, visto que podemos aplicar a devida tensão e controlar a corrente máxima de acordo com os dados do fabricante. Particularmente, para os modelos com baixas correntes de carga, como 0,5 A ou 1 A, o uso desses equipamentos pode ser financeiramente ineficiente, uma vez que poderiam carregar até 20 ou 10 células dessas, respectivamente, e custam em média US\$ 55,00. Além disso, a conexão em paralelo não é apropriada, pois a divisão da corrente entre as células não será uniforme, o que levaria à perda do controle sobre a corrente que cada uma recebe.

No mercado, há uma variedade de equipamentos destinados ao carregamento de células, que podem ser divididos em duas categorias: modelos comerciais e modelos industriais. Os modelos comerciais são projetados apenas para o carregamento das células, como os modelos da XTAR VC2 e LiitoKala-Lii-S2. Por outro lado, os modelos industriais são utilizados por grandes fabricantes de células e realizam testes gerais em células recém-produzidas, como o modelo da ACEY, capaz de efetuar carga e descarga, apresentando sua capacidade.

Para um novo ramo, principalmente no que se refere à assistência técnica, os modelos industriais podem ser financeiramente inacessíveis, pois demandam um alto investimento. O modelo citado, da ACEY, tem um custo de US\$ 2.100,00, por exemplo. Entretanto, a longo prazo, considerando o crescimento do mercado, eles podem trazer vantagens significativas. Enquanto isso, os modelos comerciais oferecem eficiência e resultados satisfatórios a curto prazo. O valor desses produtos varia de acordo com a quantidade de células que podem carregar

e a corrente máxima que suportam. Os modelos mencionados suportam até 2 células para cargas de no máximo 1 A e 2 A totais, com preços próximos a US\$ 20,00 e US\$ 30,00, respectivamente.

Considerando esses aspectos, o carregador comercial pode ser um bom equipamento para compor as bancadas a fim de realizar os processos de carga das células de li-íon. Suas principais vantagens são o pouco espaço requerido e simplicidade. No entanto, sua principal desvantagem é o custo-benefício, principalmente se comparado às fontes de bancada que permitem o carregamento de uma variedade de estruturas e modelos com correntes mais altas.

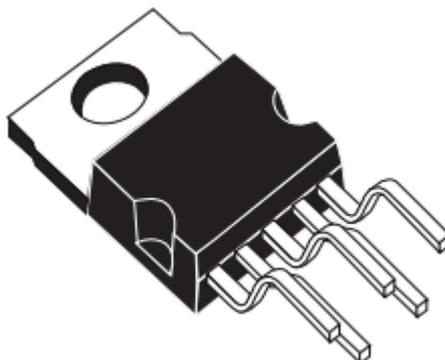
Diante desses aspectos, vamos realizar o desenvolvimento de um protótipo capaz de efetuar o carregamento das células de íons de lítio para os principais modelos no cenário de BEVs e HEVs, que são NCA, NMC e LFP. Durante todo o processo, é necessário que tanto a corrente durante o CC quanto a tensão durante o CV estejam dentro dos parâmetros ideais da célula. As células das químicas NMC e NCA tem uma tensão máxima para carga de 4,20 V, enquanto as células do modelo LFP tem um valor de carga máxima de 3,70 V. Como os valores da corrente variam de acordo com cada modelo de célula, vamos desenvolver um circuito com a possibilidade de alterar o valor de 0 até 2 A. Outro ponto importante é a sinalização do fim do carregamento. Portanto, é necessário que o projeto conte com um circuito de potência (ou circuito de controle de tensão e corrente) e um circuito de sinalização.

O objetivo desse protótipo é ter a capacidade de ser adaptado para realizar um carregamento simultâneo e controlado de várias células, utilizando como uma fonte primária de energia tanto uma fonte de bancada, quanto ser ajustado para ser um modelo similar aos comerciais, com uma entrada para fontes estabilizadoras. Além disso, seus terminais de saída tem como propósito atender a todas as possíveis estruturas.

3.1 Circuito de Potência

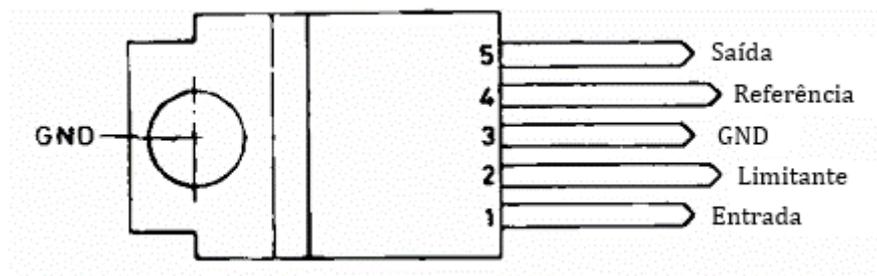
Para o desenvolvimento desse protótipo, temos como base o CI L200, da STMicroelectronics. Esse componente é capaz de realizar o controle de tensão e corrente com um circuito mais simples. A maioria dos outros CIs com características para essa aplicação só consegue garantir uma limitação de corrente e, para controlá-la, exige o uso de vários outros componentes. Portanto, esse exemplar é ideal para uma aplicação como essa, em relação aos outros. A *Figura 3.2* apresenta o CI L200 com estrutura *pentawatt*, e a *Figura 3.3* apresenta sua pinagem em esquemático:

Figura 3.2 - CI L200 pentawatt.



Fonte: (STMICROELETONICS, 2000)

Figura 3.3 - Esquemático do L200.

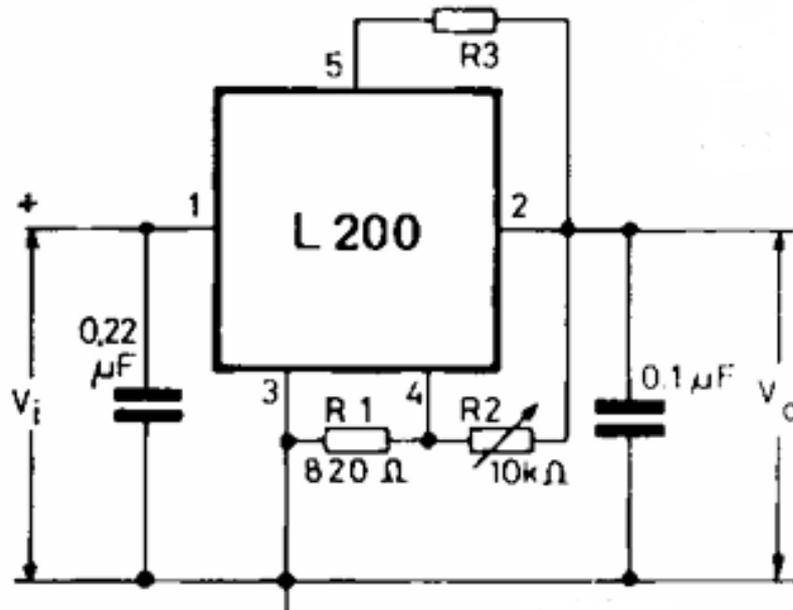


Fonte: Editada de (STMICROELETONICS, 2000)

O L200 é um circuito integrado muito eficiente na regulação programada de tensão, corrente e limitação de corrente e potência. Além disso, ele possui proteções térmicas, contra curto-circuito e sobretensão (até 60 V). Sua corrente de saída pode ser ajustada em até 2 A (desde que o CI seja mantido abaixo de 150 °C), e a tensão de saída pode variar entre 2,85 V e 36 V. Suas aplicações incluem ser um CI para regular tensão e corrente, mas também pode ser utilizado para carregar baterias e controlar a velocidade de motores. Comparado a outros CIs, como o LM317 (um dos disponíveis para essa aplicação), sua corrente de saída é mais elevada sob uma mesma temperatura, garantindo maior estabilidade durante a aplicação em correntes abaixo da máxima (STMICROELECTRONICS, 2000) (TEXAS INSTRUMENTS, 1997).

O circuito base desse CI pode ser visto na *Figura 3.4*:

Figura 3.4 - Circuito base do L200.



Fonte: (STMICROELECTRONICS, 2000)

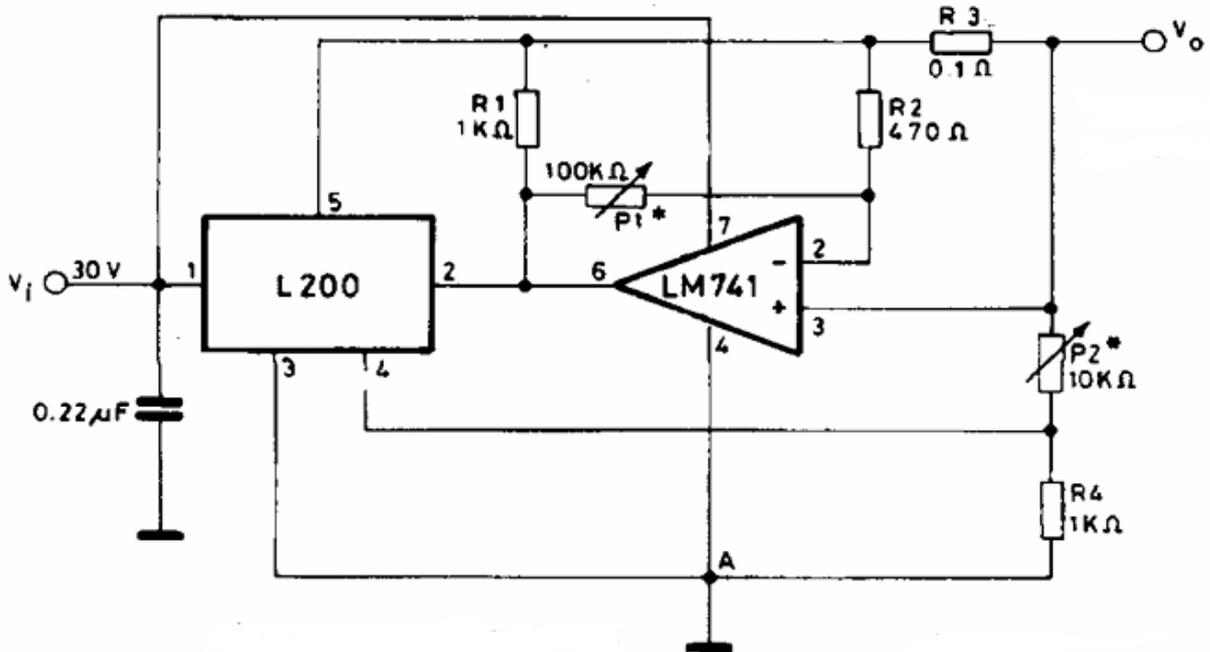
O resistor R1 e o potenciômetro R2 são responsáveis pelo ajuste de tensão na saída, enquanto o resistor R3 é responsável pela limitação da corrente. O valor da tensão de saída (V_O) pode ser vista na Eq. 3.1, e da corrente máxima em Eq. 3.2:

$$V_O = V_{Ref} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (3.1)$$

$$I_{O,máx} = \frac{V_5 - V_2}{R3} = \frac{V_{SC}}{R3} \quad (3.2)$$

A tensão V_{Ref} é citada na folha de dados como um valor típico de 2,77 V, mas pode variar entre 2,64 V e 2,86 V. O V_{SC} é uma queda de tensão interna entre o pino ‘saída’ (pino 5) e o ‘limitante’ (pino 2), geralmente registrada como 0,45 V, mas pode variar de 0,38 V a 0,52 V. Apesar de este circuito ser um bom controlador de tensão, é apenas um limitador de corrente, pois não conseguimos variá-la sem alterar a resistência R3, que é muito baixa, impossibilitando o uso de uma resistência variável. Portanto, para o carregamento de células, considerando as diferentes possibilidades de corrente máxima de carga que cada modelo pode ter, é interessante escolher um projeto que possa ser facilmente adaptado. Diante disso, podemos recorrer a outro circuito apresentado:

Figura 3.5 - Circuito do L200 como regulador de tensão e corrente.



Fonte: (STMICROELETONICS, 2000)

Com este circuito, temos a adição do amplificador operacional LM741. O valor da tensão de saída ainda segue a Eq. 3.1, mas podemos alterar o valor da tensão na porta 5 com o potenciômetro P1, e a corrente de saída (I_O) passa a depender da diferença de tensão entre V_5 e V_O , conforme a Eq. 3.3:

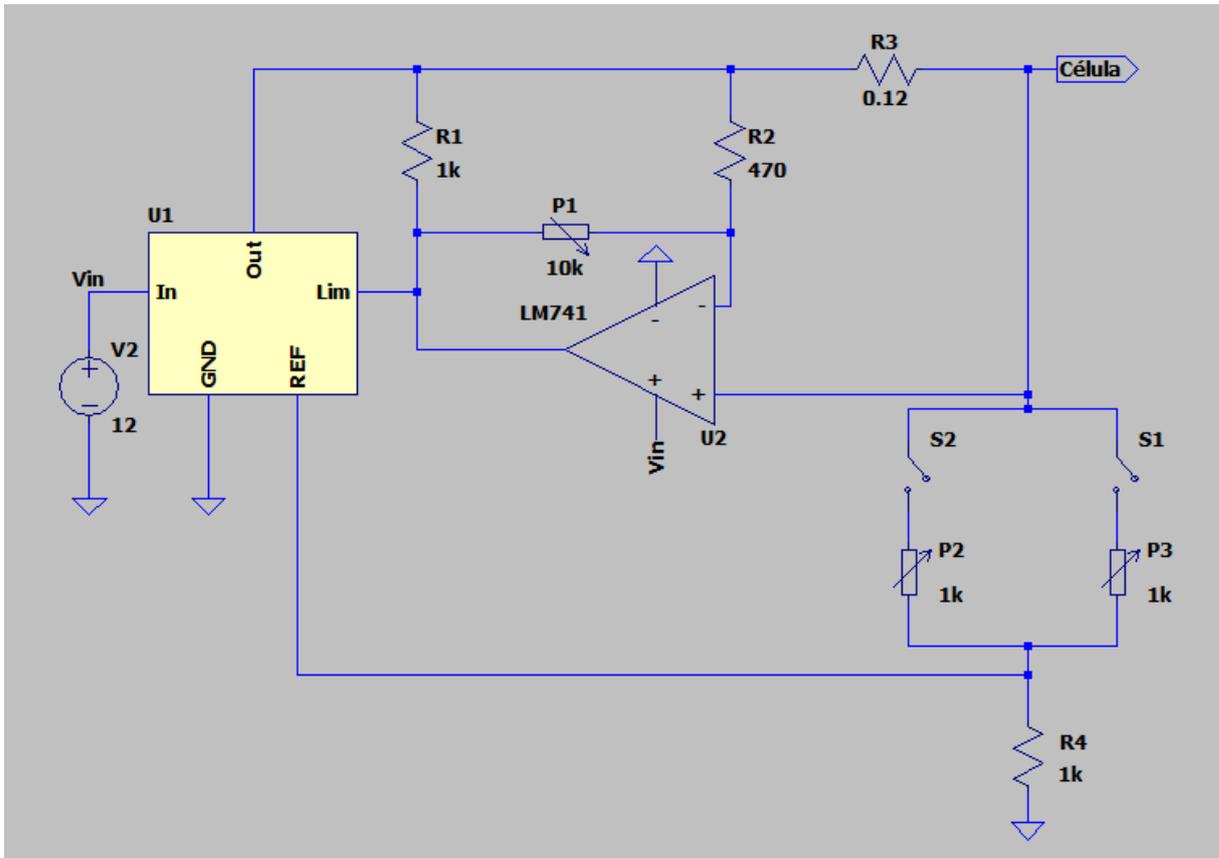
$$I_O = \frac{V_5 - V_O}{R_3} \quad (3.3)$$

$$V_5 = V_2 + V_{SC} \quad (3.4)$$

Agora, é possível alterar livremente o valor da corrente. O potenciômetro P1 ajusta o ganho do circuito do amplificador de forma estável para controlar o valor da tensão V_2 , que, indiretamente, modifica V_5 , já que ambos se relacionam através do V_{SC} , conforme a Eq. 3.4. No entanto, caso a corrente de saída provoque um estresse térmico no L200, ocorrerá uma saturação, reduzindo-a como forma de proteção ao CI. Isso é válido tanto para este circuito quanto para o anterior; portanto, para garantir uma corrente mais elevada, é necessário um bom resfriamento do CI, utilizando dissipadores e/ou coolers.

Devido às condições do projeto, podemos adaptar o circuito de potência. Como o desejo é carregar células de li-íon das químicas NMC, NCA e LFP, e temos duas opções de valores para a saída: 4,20 V e 3,70 V, podemos configurar o circuito conforme a Figura 3.6:

Figura 3.6 - Circuito regulador de tensão e corrente.



Fonte: Autor

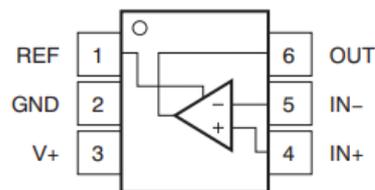
A alteração de R3 de 100 m Ω para 120 m Ω foi devido à falta do resistor de 100 m Ω no mercado regional durante a fase de teste do protótipo. As chaves são adicionadas para facilitar a manipulação do valor da tensão de saída, variando entre 4,20 V e 3,70 V. Conforme a Eq. 3.1, observamos que os valores dos potenciômetros P2 e P3 podem ser inferiores a 1 k Ω . Além disso, como o valor da tensão de saída é no máximo 4,20 V, não é necessário um potenciômetro de 100 k Ω para ajuste da corrente; um de 10 k Ω é o suficiente.

3.2 Circuito de Sinalização

O circuito de sinalização tem como finalidade indicar o término do carregamento da célula. Existem diversas formas de realizar uma sinalização: algumas mais sofisticadas, como uma tela indicando o estado de carga ou o valor da corrente; outras mais simples, como um Diodo Emissor de Luz (LED - *Light-Emitting Diode*), que acende ao iniciar do processo e apaga ao finalizar. Optaremos pela segunda opção.

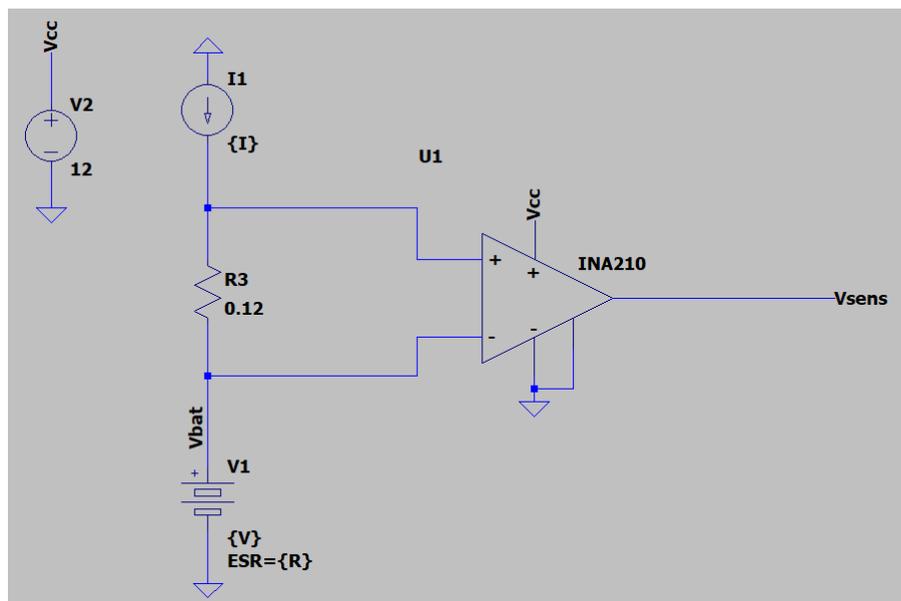
Ao todo, o circuito de sinalização é dividido em três partes: um sensor de corrente, um amplificador não-inversor e um comparador. Para realizar o monitoramento da corrente, podemos utilizar um amplificador de instrumentação. Esse tipo de amplificador pode gerar uma saída com um alto ganho, baseado na diferença de potencial entre suas entradas inversora e não-inversora. Portanto, ao utilizar um resistor *shunt*, conseguimos o monitorar a corrente que vai para a carga. Considerando que o circuito de potência já possui um resistor com essas características, é apenas necessário conectar o CI escolhido. Para esse propósito, optamos pelo INA210 devido ao seu alto ganho (200 V/V), baixo custo e faixa de operação adequada (TEXAS INSTRUMENTS, 2008). Na *Figura 3.7* temos seu esquemático e na *Figura 3.8* o circuito sensor da corrente de carga:

Figura 3.7 - Esquemático do INA210.



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2008)

Figura 3.8 - Circuito sensor de corrente.



Fonte: Autor

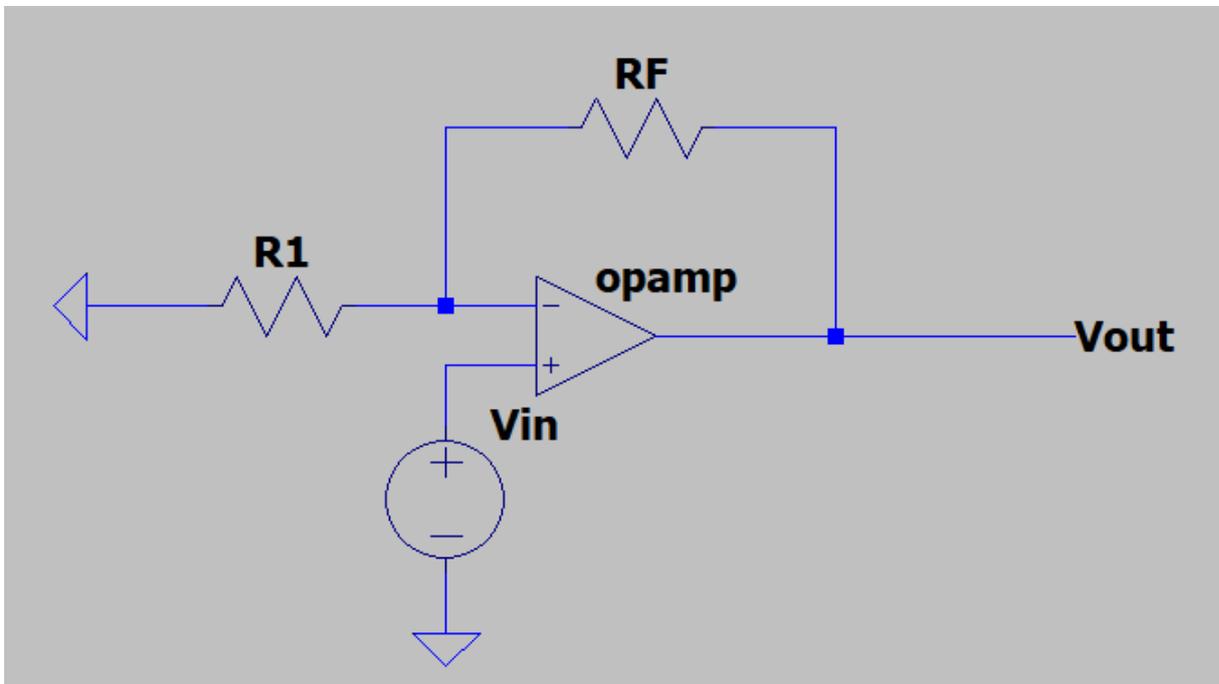
No circuito apresentado acima, resumimos o circuito de potência como uma fonte de corrente seguida pelo seu próprio resistor *shunt* e da carga, ou célula. Dessa forma, a queda de

tensão em R3 fornece a ddp necessária para que o INA210 forneça uma tensão de saída referente à corrente destinada ao carregamento da célula. Portanto, considerando que o ganho do circuito é de 200 V/V, ao passar 500 mA teremos uma queda de tensão em R3 de 60 mV, conforme a Lei de Ohm. Com o ganho, idealmente a saída do INA será de 12 V (na prática, a tensão máxima de saída será no valor da tensão de alimentação subtraída das perdas). Em 100 mA, temos uma ddp de 12 mV; portanto, em V_{sens} teremos 2,40 V.

Após o circuito sensor de corrente, passaremos por um circuito de amplificação. Esse circuito será fundamental quando a corrente estiver atingindo valores baixos, pois utilizaremos a tensão da célula como referência para o circuito comparador. Portanto, para garantir que a tensão no comparador seja ligeiramente inferior a 4,20 V a 100 mA, precisamos ampliar os 2,40 V calculados anteriormente em 1,75 vezes. Um amplificador não-inversor tem seu ganho representado pela Eq.3.5 e seu circuito pode ser visualizado na Figura 3.9:

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (3.5)$$

Figura 3.9 - Circuito de um amplificador não-inversor.



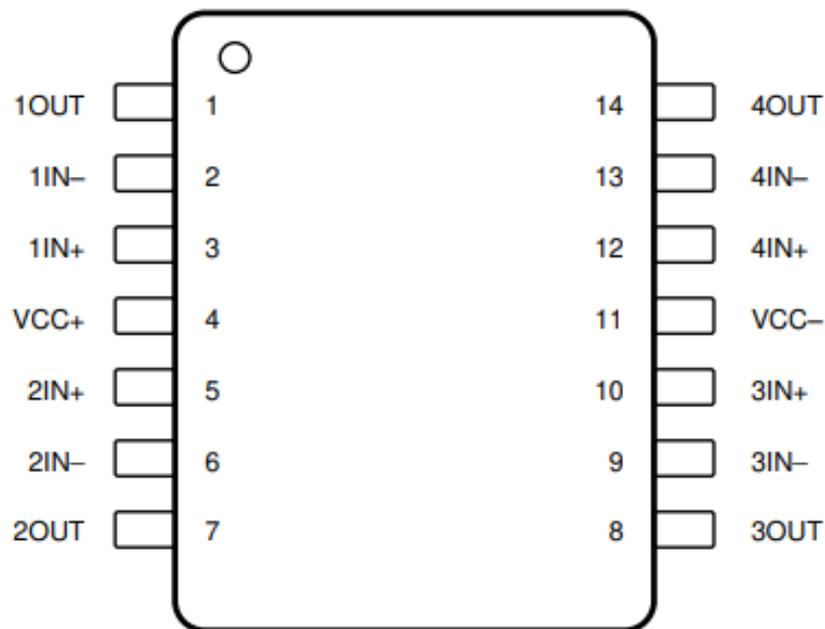
Fonte: Autor

Conforme a Eq. 3.5, com A_v igual a 1,75 e assumindo R_1 como 1,3 k Ω , precisamos que R_F seja 975 Ω . Como não é um valor comercial, trataremos R_F como 1 k Ω , admitindo um pequeno erro na corrente de corte, que passará de 100 mA para 98,9 mA.

Por fim, temos o circuito comparador, que utiliza um amplificador operacional para analisar os valores de tensão nas portas não inversora e inversora a fim de gerar uma saída de sinal “Alto” ou “Baixo”. Portanto, se a tensão na porta não inversora for superior à tensão na porta inversora, idealmente, a sua saída será a tensão de alimentação. Caso contrário, a tensão de saída será igual à alimentação negativa.

O amplificador utilizado será o LM224. Como a ideia é produzir um circuito capaz de carregar duas células, precisamos de dois amplificadores para o ganho e mais dois para a comparação, e este CI proporciona todos eles em um único componente. Na Figura 3.10 temos seu esquemático:

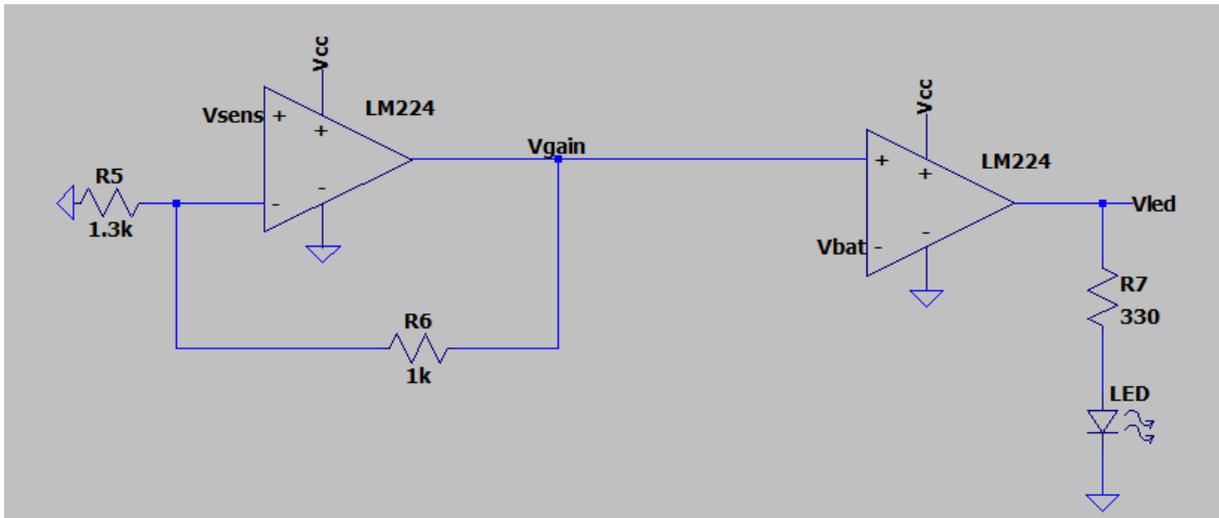
Figura 3.10 - Esquemático do LM224.



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 1975).

Agora, na Figura 3.11, temos o circuito de ganho e comparação:

Figura 3.11 - Circuito comparador.



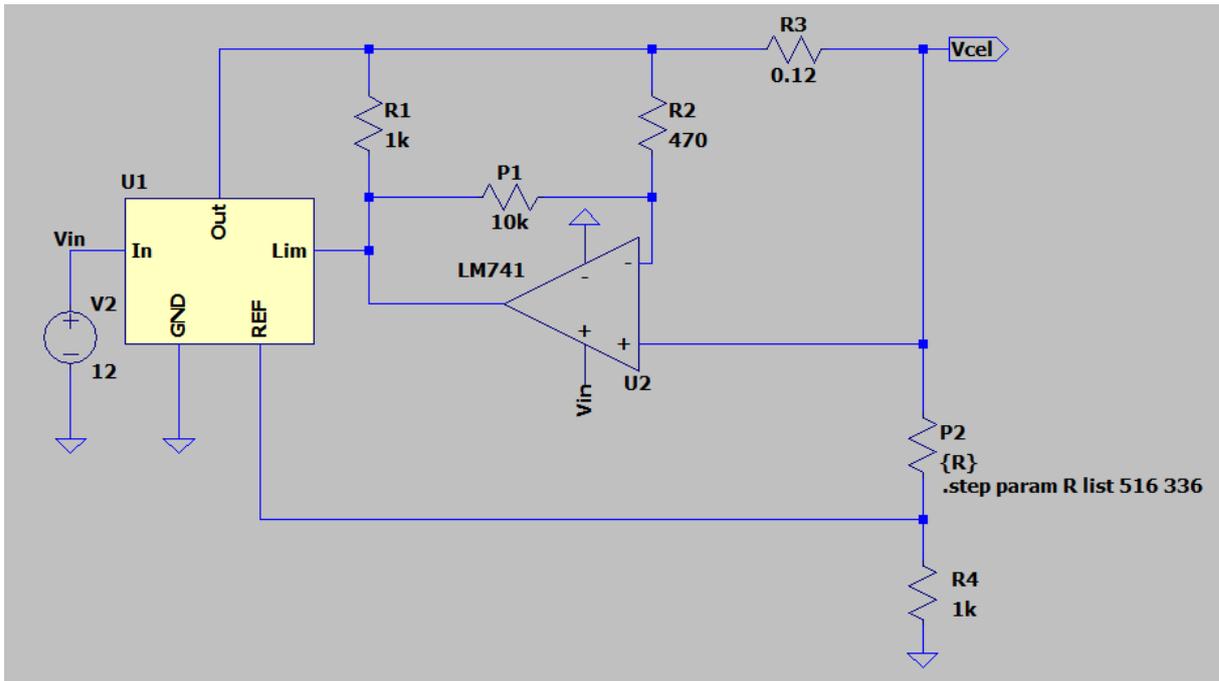
Fonte: Autor

Portanto, enquanto V_{gain} for maior que V_{bat} , temos uma saída “Alto” em V_{led} , permitindo a iluminação do LED. Em contrapartida, quando V_{gain} reduzir e ficar abaixo de V_{bat} , temos uma saída “Baixo” em V_{led} , logo, o LED apaga, indicando o fim do carregamento.

3.3 Simulações dos Circuitos

A simulação é uma maneira de obter uma representação visual melhor do seu projeto. Usaremos o LTSpice para realizar simulações separadas dos circuitos de potência e sinalização. Antes disso, é importante salientar que não há um modelo Spice desenvolvido pelo fabricante do L200. No entanto, em (SICKLE, 2009), encontramos um macromodelo desenvolvido por um usuário do LTSpice. Entretanto, por não ser 100% similar, esse modelo tem algumas limitações. Inicialmente simularemos o circuito de potência sem carga para confirmar o controle de tensão baseado na Eq. 3.1. A Figura 3.12 apresenta o circuito a ser simulado no software:

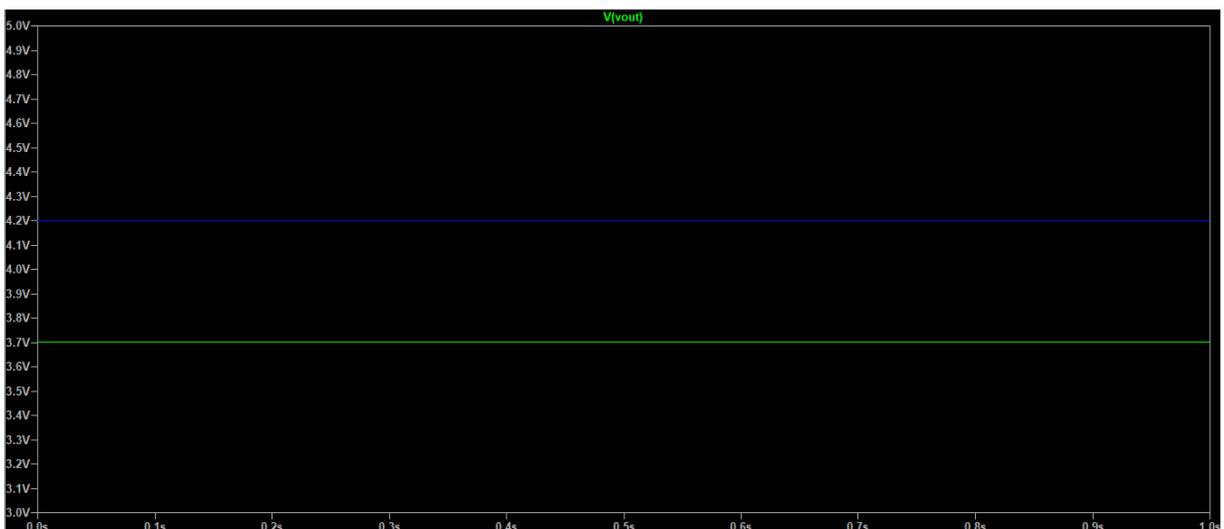
Figura 3.12 - Circuito de potência para a simulação no LTSpice.



Fonte: Autor

Na *Figura 3.13* vemos o resultado dos valores de tensão para o potenciômetro P2 igual a 516 Ω e 336 Ω , respectivamente. Os resultados foram 4,20 V e 3,70 V em V_{cel} .

Figura 3.13 - Valores da tensão V_{cel} do circuito de potência.



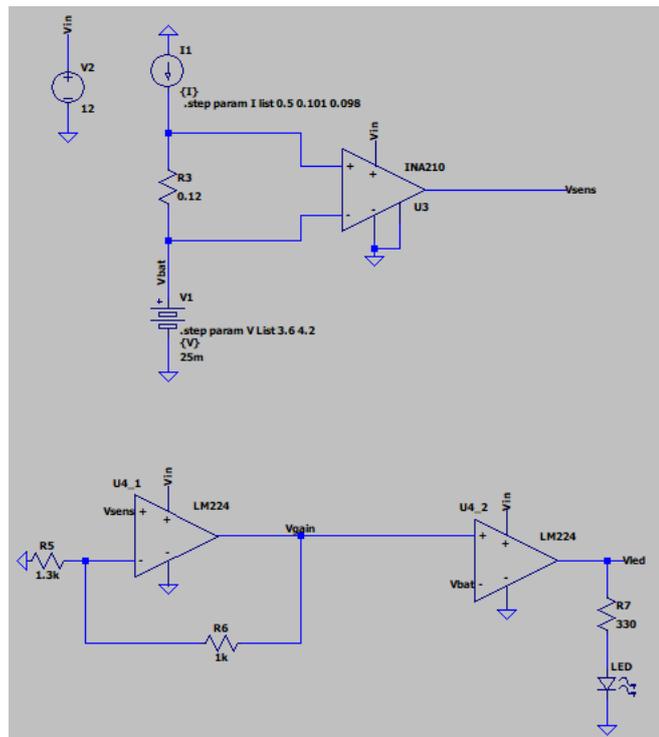
Fonte: Autor.

Como o macromodelo utilizado do L200 apresenta instabilidade para circuitos onde deve ocorrer o controle de corrente (SICKLE, 2009), a simulação com carga não será realizada.

Para confirmarmos a atuação do controle de corrente será realizado testes em bancada que podem ser acompanhados no Capítulo 4.

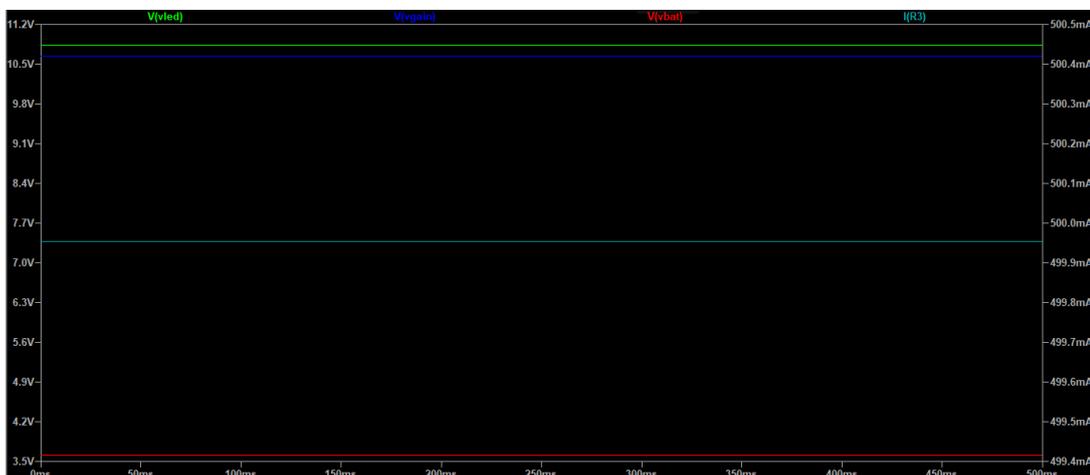
Agora, vamos observar o comportamento do circuito de sinalização. Lembrando que há dois momentos distintos: um em que a corrente ainda não atingiu o valor de corte e o LED deve permanecer aceso, e outro em que a corrente atinge o valor de corte e o LED deve apagar. Portanto, temos seu circuito apresentado na *Figura 3.14*:

Figura 3.14 - Circuito de sinalização no LTSpice.



Fonte: Autor

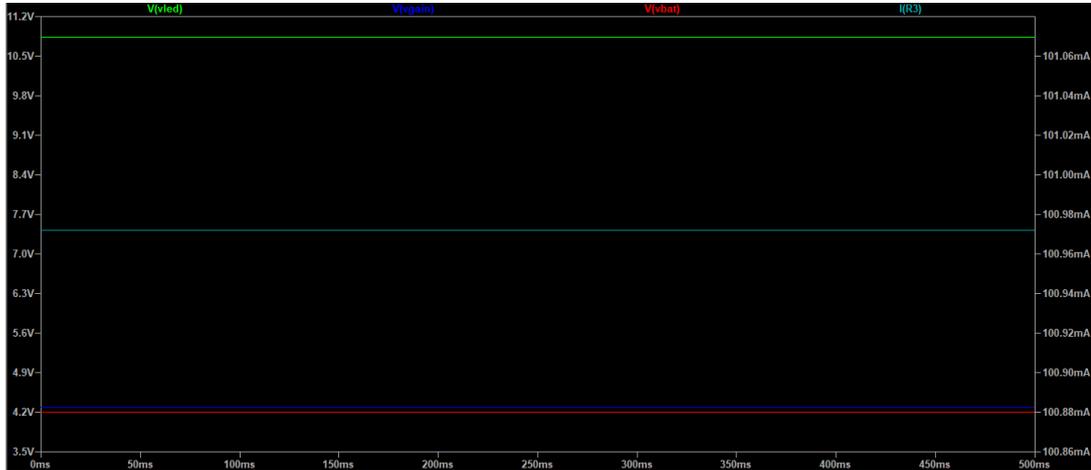
Figura 3.15 - Resultado da simulação do circuito de sinalização, para 500 mA e 3,6 V.



Fonte: Autor

Observe pela *Figura 3.15* que a tensão do ganho é consideravelmente superior à tensão da célula, resultando em uma saída do comparador de mais de 10,5 V.

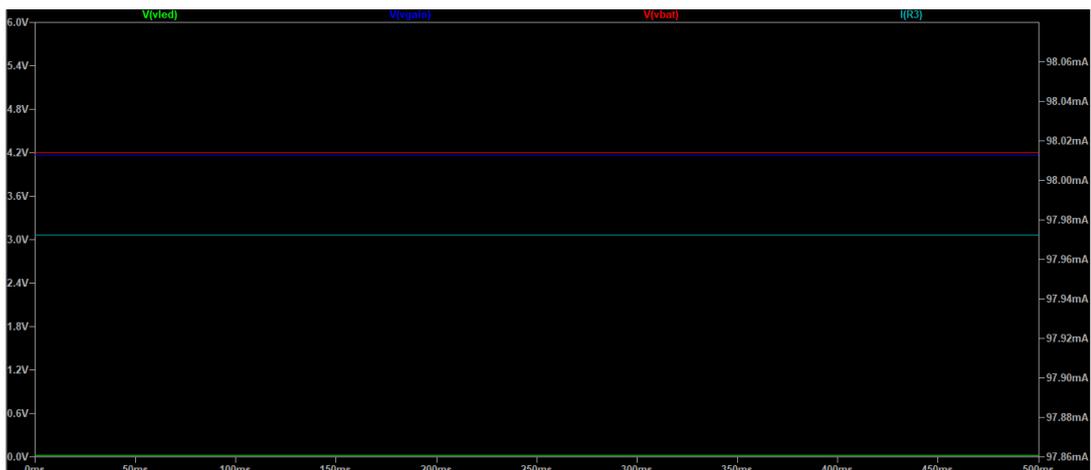
Figura 3.16 - Resultado da simulação do circuito de sinalização, para 101 mA e 4,2 V.



Fonte: Autor

Agora, na *Figura 3.16*, podemos observar que a tensão do ganho está próxima à da célula, mas ainda é ligeiramente superior. Com isso, a saída do comparador permanece em sinal “Alto”. Porém, quando a tensão do ganho é inferior à da célula, a saída do comparador se aproxima de 0 V, indicando um sinal “Baixo”, conforme mostrado na *Figura 3.17*:

Figura 3.17 - Resultado da simulação do circuito de sinalização, para 98 mA e 4,2 V.



Fonte: Autor

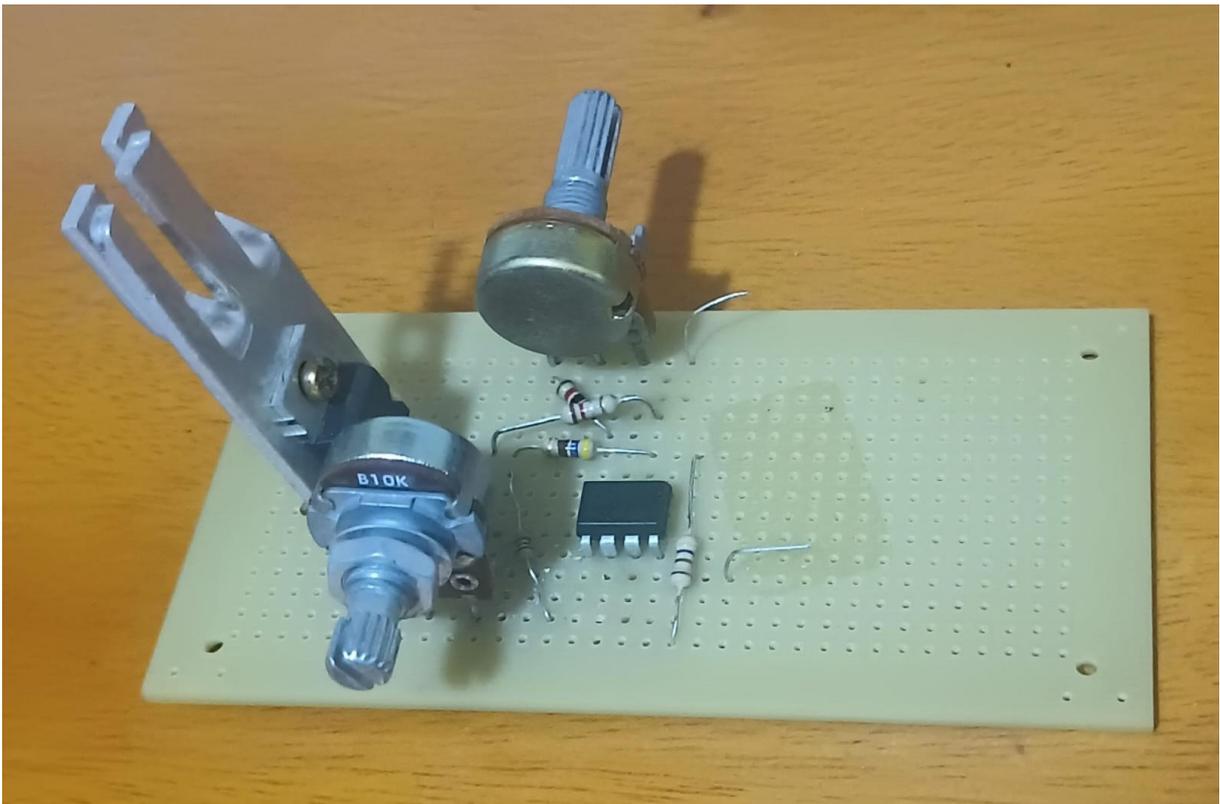
4. EXPERIMENTOS NO CIRCUITO DE POTÊNCIA

Assim como em todo protótipo, é necessário realizar testes para confirmar a sua operação. Especialmente neste projeto, que não foi possível simular sua operação em controle de corrente, um estado de operação fundamental para a aplicação desejada. O objetivo deste experimento é confirmar o funcionamento do circuito de potência para podermos realizar a fabricação de uma Placa de Circuito Impresso (PCB – *Printed Circuit Board*) profissional e avaliar os níveis de operação, como as tensões mínimas e máximas de entrada, entre outros.

4.1 Materiais utilizados

- Um protótipo de teste;

Figura 4.1 - Protótipo de teste.



Fonte: Autor.

Para realização dos testes, o circuito foi montado em uma placailhada contendo todos os componentes do circuito de potência, que incluem: um CI L200CV da STMicroelectronics; um CI LM741 da STMicroelectronics; um potenciômetro de 1 k Ω ; um potenciômetro de 10

k Ω ; um resistor de 120 m Ω e 0,25 W; um resistor de 1 k Ω e 0,25 W; um resistor de 1 k Ω e 0,125 W; e um resistor de 470 Ω e 0,25 W. Adicionalmente, foi incluído um resistor de 4,7 Ω em série com o potenciômetro de 10 k Ω , funcionando como um jumper, e um dissipador para o L200CV, a fim de elevar a corrente de saturação por temperatura. No entanto, ainda não é possível atingir o valor máximo de 2,0 A fornecido pelo CI.

- Uma fonte de bancada Instutherm FA-3030;

Figura 4.2 - Exemplar da fonte de Bancada utilizada.



Fonte: (INSTUTHERM)

- Quatro multímetros de bancada Minipa MDM-8045;

Figura 4.3 - Exemplar do multímetro Minipa MDM-8045.



Fonte: (MINIPA)

- Um reostato de 10 Ω da ELETELE;

Figura 4.4 - Fotografia do reostato ELETELE.



Fonte: Autor.

- Um reostato da edutec de 200 Ω ;

Figura 4.5 - Fotografia do reostato da edutec.



Fonte: Autor.

- Um reostato da Politerm modelo POL-412S de 200 Ω ;

Figura 4.6 - Exemplar do reostato da Politerm.



Fonte: Editado de (POLITERM)

Todos os materiais de bancada foram disponibilizados pelo laboratório de Eletrônica Digital da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), situado no bloco 1E sala 11.

- Duas células de li-íon da Samsung SDI INR18650-30Q;

Figura 4.7 - Exemplar de uma célula da SDI 18650-30Q.



Fonte: (BATTERY UPGRADE)

As células foram cortesia do Laboratório de Mobilidade Automobilística e Urbana (LAMAU), também da FEELT-UFU, sala 1E26.

- Um notebook para armazenamento de dados e cronometragem de testes.

4.2 Descrição prática

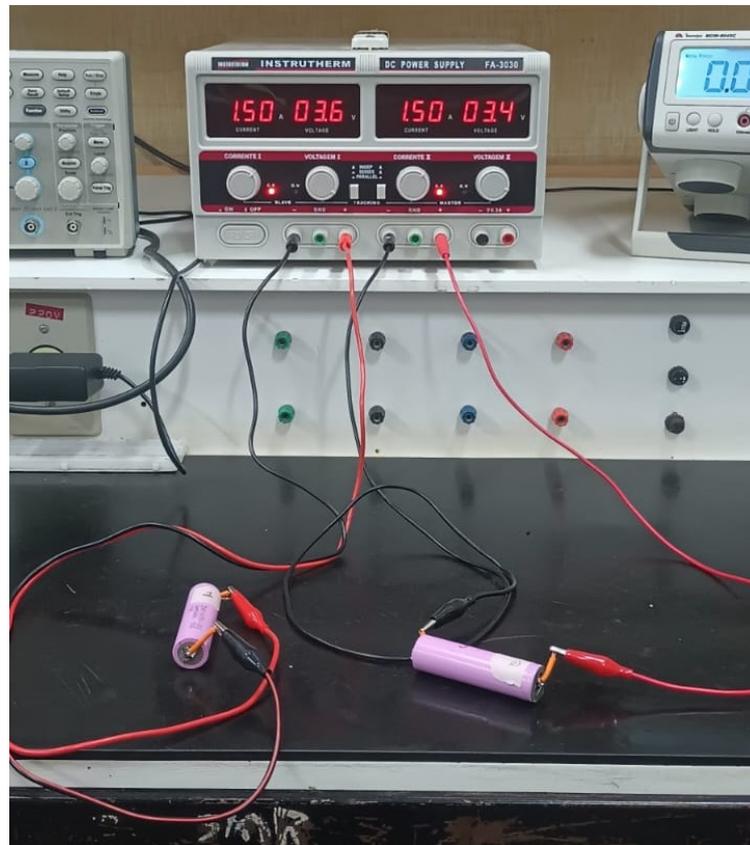
Em resumo, precisamos realizar um teste de capacidade na célula utilizando uma fonte de bancada, já que se trata de uma célula previamente utilizada e armazenada, havendo grandes chances de sua capacidade estar reduzida. Em seguida, faremos o teste novamente, desta vez com o protótipo. Isso nos permitirá comparar a capacidade da célula com o teste anterior e avaliar o comportamento do circuito de potência ao longo do teste.

4.2.1 *Teste de capacidade da célula*

Como foram entregues duas células, realizaremos um carregamento através da fonte de bancada e uma descarga com a ajuda dos reostatos em ambas as células, com o objetivo de comparar qual delas contém a maior capacidade, para então selecionar essa como a que será utilizada no teste do protótipo. Na folha de dados dessa célula, vemos que a corrente de carga máxima é de 4,0 A, porém, para este teste, aplicaremos o valor padrão de 1,5 A (SAMSUNG SDI, 2015). Devido às condições a que ela esteve submetida durante o armazenamento, é possível que danos internos tenham ocorrido. Portanto, é plausível supor que em correntes mais altas, sua ESR acabe dissipando uma parte considerável da energia entregue pela fonte na forma de calor. Além disso, o teste pelo protótipo será de 0,5 A, logo, é importante realizar esse teste com uma corrente mais próxima.

Projetando 4,20 V na fonte de bancada, vamos apenas realizar uma ligação em paralelo entre as duas saídas das fontes com cada célula, a *Figura 4.8* representa o momento em que o teste estava sendo realizado:

Figura 4.8 - Carregamento realizado pela fonte.



Fonte: Autor

Após o carregamento das células, foi possível notar que ambas haviam perdido sua capacidade, pois poucos minutos após o fim do carregamento, a tensão de circuito aberto não havia se estabilizado próxima aos 4,20 V. O carregamento foi considerado completo quando a tensão de corte indicada na folha de dados de 150 mA foi alcançada.

Agora, temos que realizar a descarga. Em (SAMSUNG SDI, 2015), encontramos os valores de corrente de descarga. Tentaremos manter a corrente o mais próximo possível de 0,5 A, variando os reostatos, seguindo assim o valor padrão. Segundo a Lei de Ohm, sabemos que para isso é necessário variar a resistência entre $8,4 \Omega$ e $5,0 \Omega$ (baseado na tensão de operação idealmente entre 4,20 V e 2,50 V). Como um dos reostatos é de 10Ω , temos bom controle sobre esses valores, mas os outros têm uma resistência um tanto elevada. Portanto, vamos colocá-los em paralelo, mantendo um deles com um valor bem inferior, de modo que o outro sirva como um ajuste fino de resistência (pois a conexão em paralelo de duas resistências sempre resulta em um valor inferior ao menor dos valores das resistências). Além disso, utilizamos quatro multímetros, um em paralelo e um em série com cada célula, para acompanhar os valores de

tensão e corrente e garantir a integridade do teste. A *Figura 4.9* representa esse momento do teste:

Figura 4.9 - Teste de descarga das duas células.



Fonte: Autor

Então, conforme mencionado, esta etapa foi realizada para obter a capacidade da célula. Com o auxílio do notebook, avaliamos o tempo de duração de cada célula durante a descarga a 500 mA. Com esses dados, podemos determinar a capacidade utilizando a *Eq. 4.1*. Mais abaixo, na Tabela 4.1, temos os resultados do experimento:

$$Cap = I \times \Delta t_{des} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 - Dados do teste de descarga.

	<i>Tempo de descarga</i>	<i>Capacidade (Ah)</i>
<i>Célula 1</i>	4:47:47	2,40
<i>Célula 2</i>	5:24:45	2,71

Fonte: Autor

Portanto, a capacidade (*Cap*) de uma célula pode ser encontrada multiplicando a corrente (*I*) pelo tempo de descarga (Δt_{des}), em horas. Assim, a capacidade da célula 2 é superior, e, portanto, será utilizada para testar a eficácia do carregamento pelo protótipo. Um adendo: a energia específica da célula 2 é de aproximadamente 9,76 Wh, calculando-se conforme a *Eq. 2.1*, considerando a tensão nominal da célula de 3,6 V.

4.2.2 Teste de desempenho do circuito de potência

Neste segundo teste, o objetivo é verificar a estabilidade da corrente durante o estágio CC e se ocorre compatibilidade na capacidade da célula quando descarregada novamente, em comparação com o teste anterior. Para isso, utilizaremos a fonte de bancada para energizar nosso protótipo de teste, colocando um dos multímetros em paralelo com a saída para medir a tensão da célula e o outro em série com a célula para medir a corrente que passa por ela. Durante o processo, iremos armazenar os dados apontados pelos multímetros a cada 30 segundos em uma planilha, visando gerar uma curva característica de carga da célula pelo protótipo. A foto apresentada na *Figura 4.10* representa o momento do teste:

Figura 4.10 - Carregamento da célula pelo protótipo de teste.



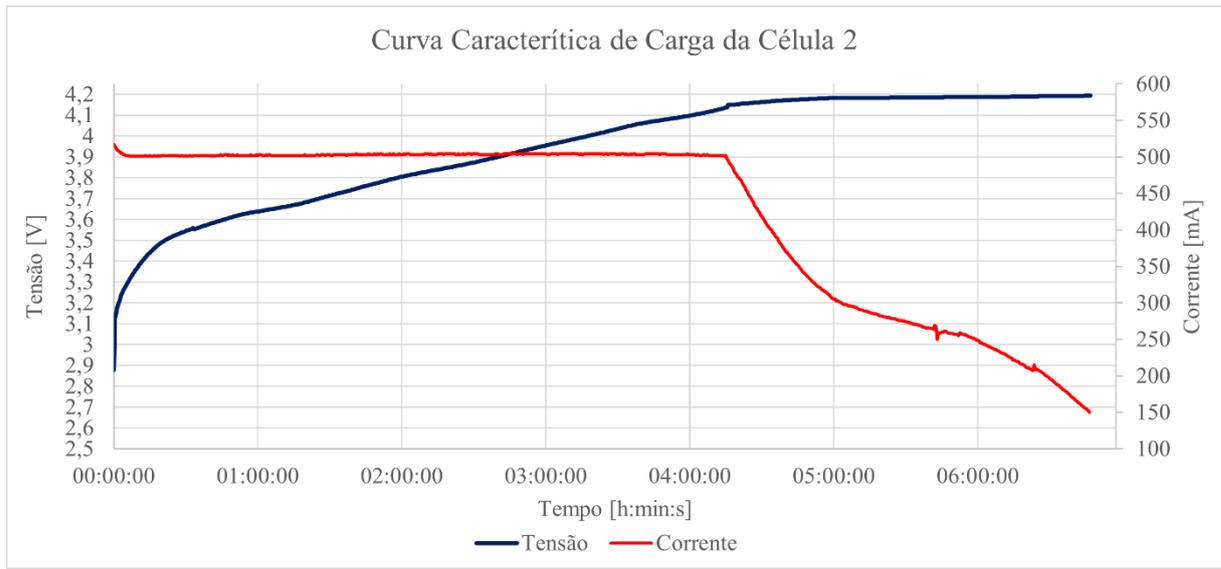
Fonte: Autor

Este teste teve uma duração total de 6 horas e 47 minutos. A condição nominal de operação da tensão de saída foi de 4,20 V (+/- 0,02 V), e da corrente de saída foi de 503 mA (+/- 2 mA), valores muito próximos dos desejados.

A célula estava com tensão em circuito aberto de 2,878 V e, assim que o carregamento foi iniciado, subiu para 3,125 V. A energia total entregue à célula foi de 11,17 Wh, porém, como sabemos pelo teste de descarga anterior, ela não se encontra em condições nominais ideais; logo, parte dessa energia deve ter sido perdida na forma de calor devido à ESR. A tensão de carga final foi de 4,193 V, alcançada quando a corrente de corte de 150 mA foi atingida. Alguns detalhes a serem considerados: durante o estágio CV, percebe-se a ocorrência de alguns ruídos (estima-se que a causa tenha sido leves movimentos nos cabos conectados à célula, algo

comum nesse estágio); já durante o CC, logo no início, antes do aquecimento do CI, houve um momento em que a corrente de saída extrapolou os valores nominais. No entanto, trata-se de um erro inferior a 3% que foi rapidamente amortecido com o aquecimento do L200, o que levou apenas 4 minutos e 30 segundos. Todos esses dados podem ser observados na *Figura 4.11*:

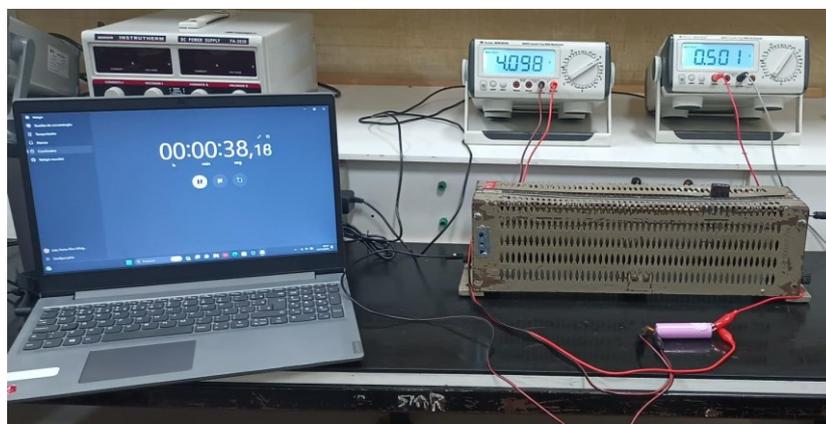
Figura 4.11 - Teste de carga da célula com o protótipo.



Fonte: Autor

Agora, com a ajuda do reostato de 10Ω , vamos descarregar a célula e verificar se foi mantida uma boa capacidade após o carregamento realizado pelo protótipo. Teremos dois multímetros, um em paralelo e outro em série, para garantir as condições pré-estabelecidas de operação (2,5 V de mínima e 500 mA de descarga). Conforme mostra a *Figura 4.12*:

Figura 4.12 - Segundo teste de descarga na célula 2.



Fonte: Autor

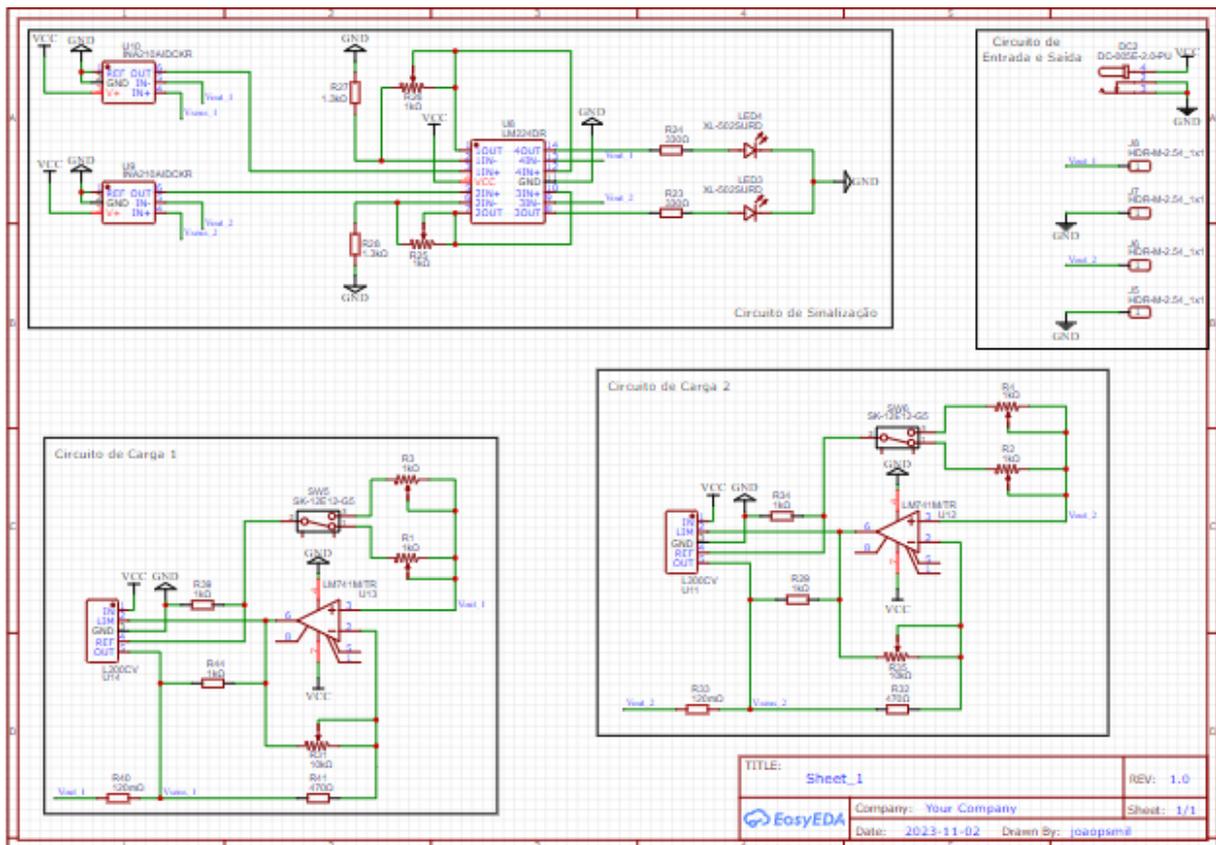
Enfim, esse teste levou 5 horas, 41 minutos e 47 segundos, ou seja, quase 5,7 horas. Portanto, obtivemos um resultado aproximado de 2,85 Ah. Essa capacidade equivale a 95% do valor nominal. Além disso, a energia aumentou para 10,26 Wh.

Esse aumento se deve ao fato de que o tempo de armazenamento da célula a tornou mais sensível à temperatura. Conseqüentemente, em correntes mais elevadas, ela apresenta uma perda de desempenho. É bastante evidente que este não deve ser o melhor valor para carga e descarga da célula no seu estado atual, mas encontrar esses valores não é o objetivo deste trabalho.

5. FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Neste capítulo, abordaremos a produção da placa de circuito integrado. Para a fabricação do protótipo, utilizaremos o EasyEDA para montar o layout da PCB. A *Figura 5.1* apresenta o esquemático no referido software:

Figura 5.1 - Esquemático do circuito completo no EasyEDA.



Fonte: Autor

Para facilitar a visualização, dividiremos cada subcircuito nas próximas imagens. A *Figura 5.2* apresenta o circuito de carga 1, enquanto a *Figura 5.3* apresenta o circuito de carga 2:

Figura 5.2 - Circuito de carga 1.

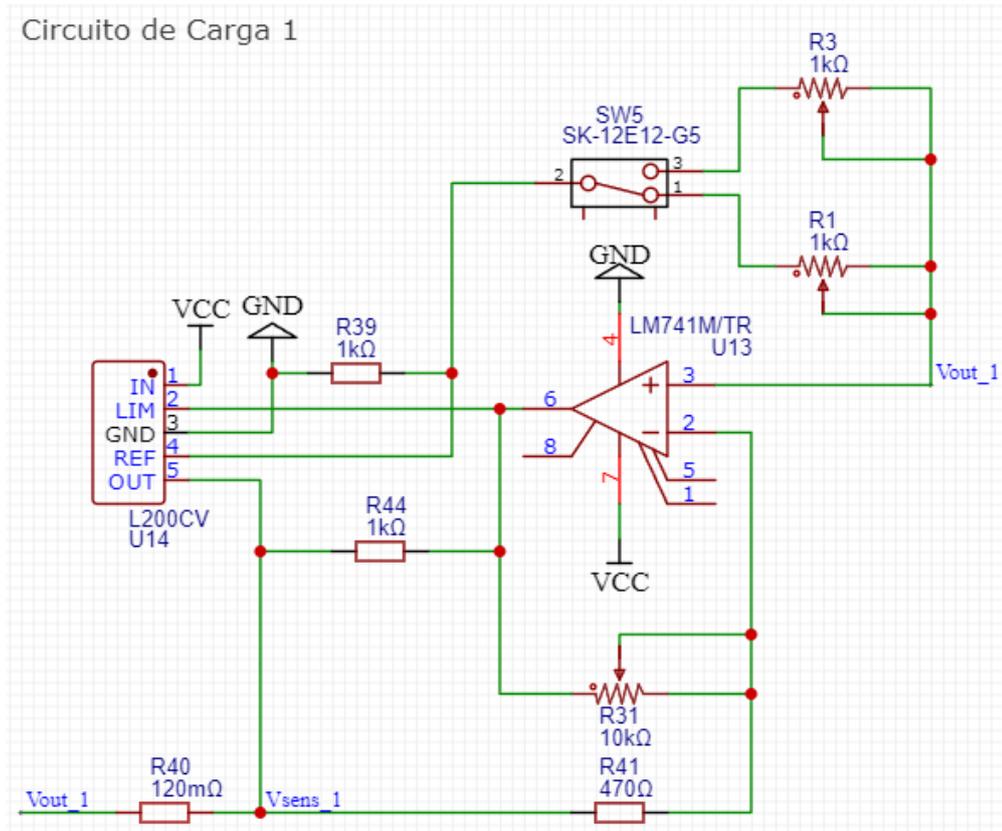
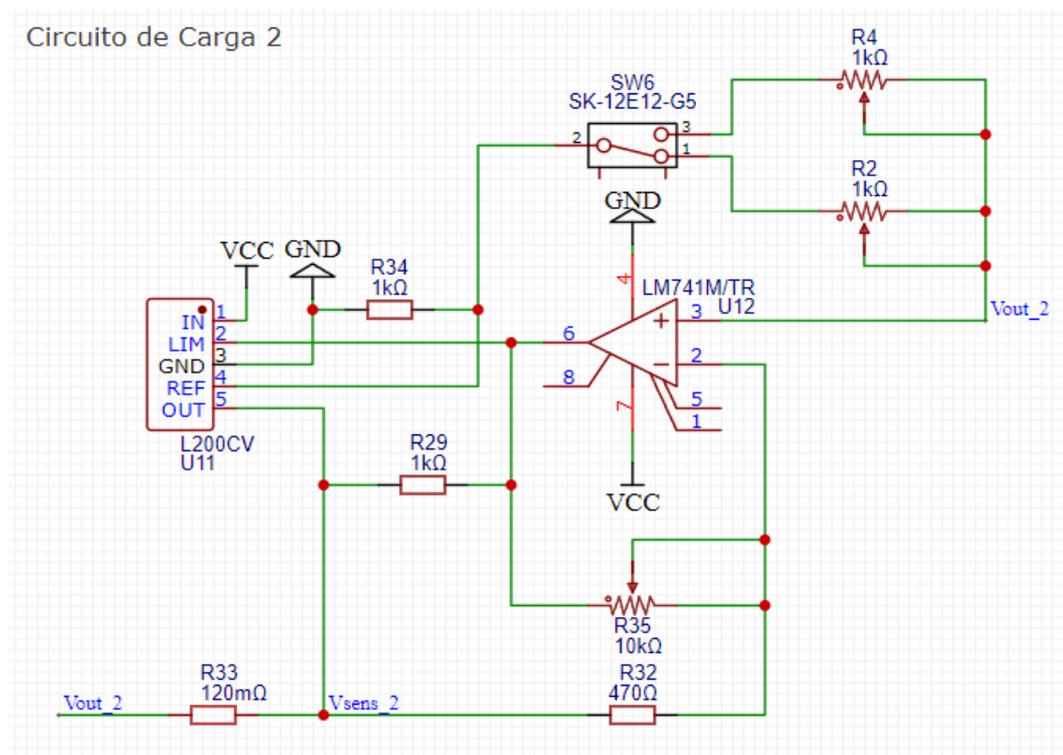
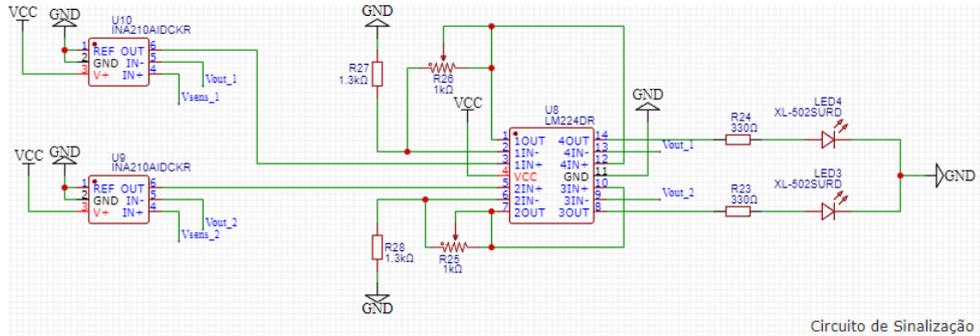


Figura 5.3 - Circuito de carga 2.



A Figura 5.4 apresenta o esquemático do circuito de sinalização:

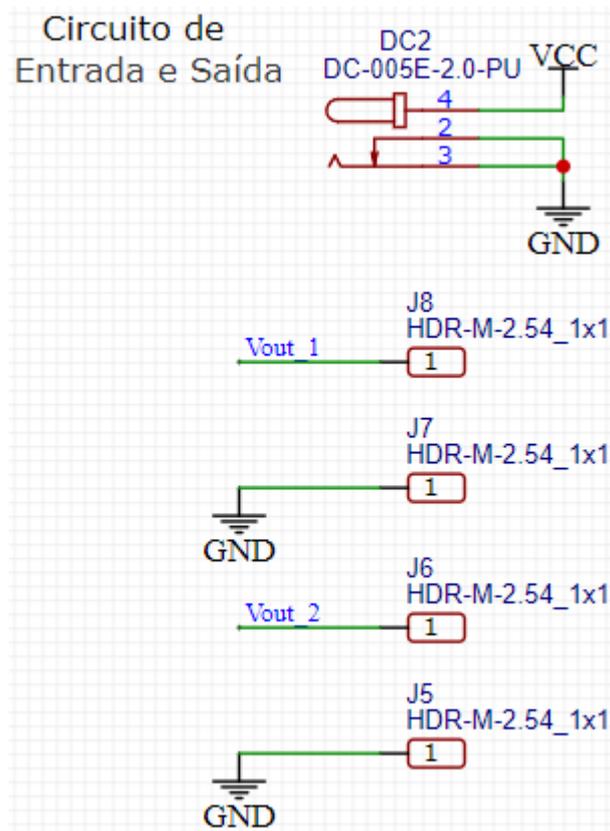
Figura 5.4 - Circuito de sinalização.



Fonte: Autor

Por fim, na Figura 5.5 temos os circuitos de entrada e saída:

Figura 5.5 - Circuito de entrada e saída.



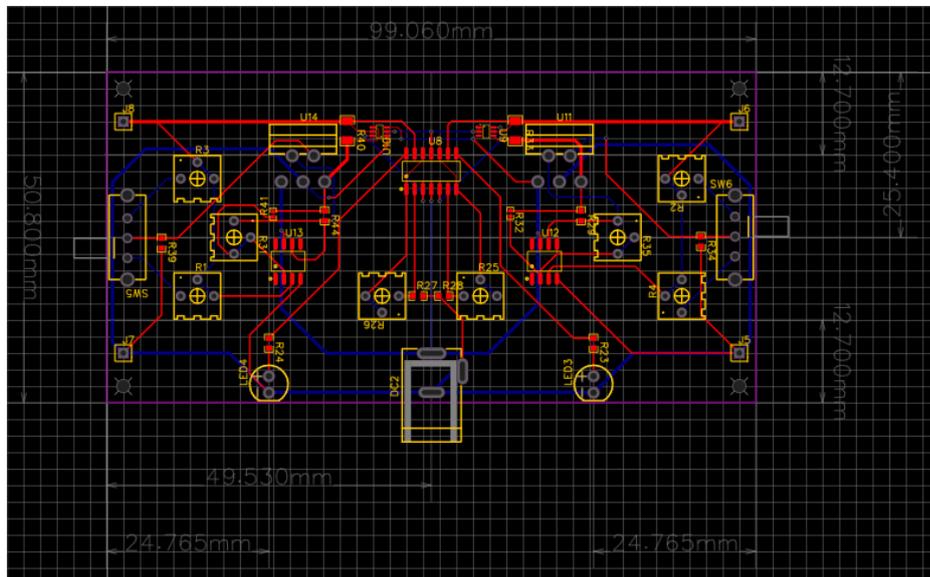
Fonte: Autor

Podemos observar que, como este projeto destina-se a meios acadêmicos, optaremos por realizar a fabricação com TRIMPOTs para ajustar a corrente de corte e maximizar a precisão

da tensão e da corrente de saída. Isso se deve ao fato de os valores de V_{SC} e V_{Ref} poderem variar de componente para componente. Se o objetivo fosse comercial, o ideal seria produzir com resistores, reduzindo assim os custos. Para a entrada, estamos optando por um pino P4, o que nos permite utilizar uma fonte estabilizadora para alimentar o circuito. No entanto, poderíamos também utilizar outros conectores.

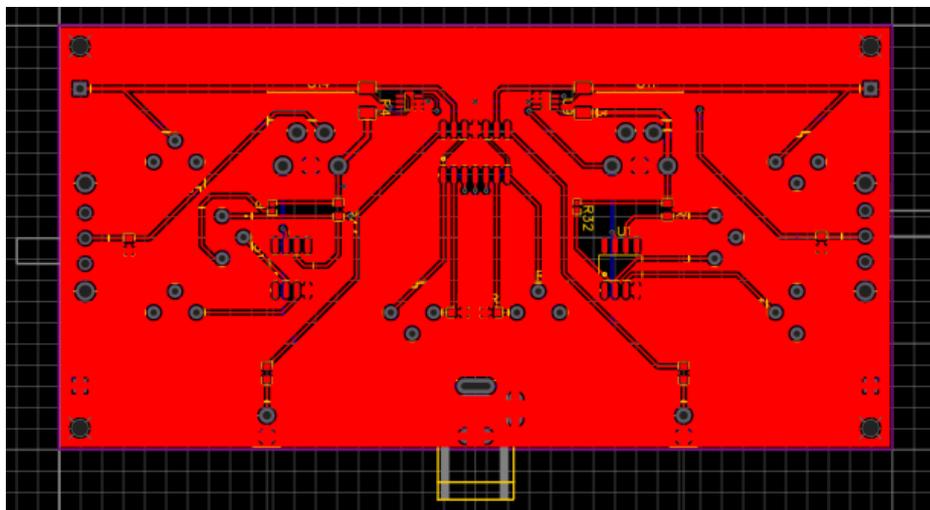
Após realizar a montagem do esquemático, segue-se a montagem do layout da placa com as conexões e os componentes nos seus devidos lugares. As ilustrações abaixo (*Figura 5.6* e *Figura 5.7*) referem-se a essa etapa:

Figura 5.6 - Montagem do layout da PCB.



Fonte: Autor

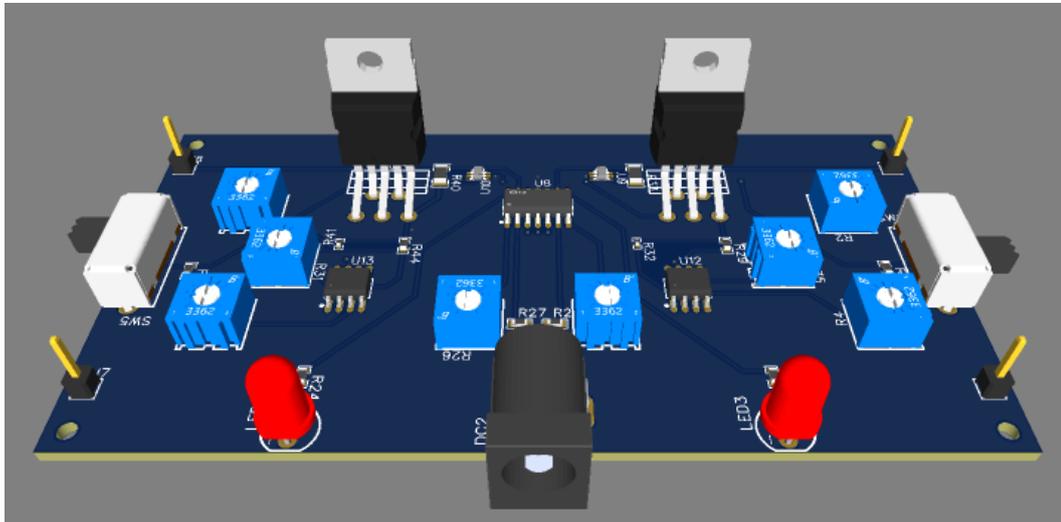
Figura 5.7 - Layout da placa com a malha do terra.



Fonte: Autor

Por fim, podemos avaliar o 3D do projeto na *Figura 5.8*:

Figura 5.8 - Ilustração 3D do protótipo.



Fonte: Autor

Quanto ao orçamento, a placa com a maior parte dos componentes foi avaliada juntamente à um parceiro da EasyEDA. No entanto, o L200 não tinha em estoque, sendo necessário a compra em mercado externo. Além dos CIs, foi feito o orçamento dos dissipadores e dos cabos de saída. A *Tabela 5.1* apresenta o orçamento de todos os componentes do projeto:

Tabela 5.1 – Orçamento completo.

	Quantidade	Valor (US\$)
Placa	5 unidades	53,33
CI L200	5 unidades	7,31
Dissipador	5 unidades	6,37
Cabos	2 metros – 1 vermelho e 1 preto	10,84

Fonte – Autor.

Considerando o valor unitário de cada componente e 0,5 metros de cada cor para os cabos, obtemos um valor final de US\$ 18,82.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que diz respeito à revisão histórica e bibliográfica, podemos acompanhar os diferentes modelos químicos desenvolvidos ao longo dos anos. A ideia transmitida é que, inicialmente, as baterias tinham um uso mais restrito. Conforme o tempo avançou, houve um aumento significativo no uso de baterias. Atualmente, a sociedade é totalmente dependente delas, uma vez que as encontramos em aparelhos telefônicos, notebooks e, agora, até nos meios de transporte.

No que diz respeito ao protótipo e considerando todos os pontos citados, bem como os dados de um teste de operação do circuito, é possível gerar uma folha de dados, apresentada na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 - Folha de dados do protótipo.

Tensão mínima de entrada ($V_{in,min}$)	6,7	V
Tensão máxima de entrada ($V_{in,máx}$)	16	V
Corrente máxima de entrada ($I_{in,máx}$)	4,00	A
Tensão de saída (V_{out})	3,7 ou 4,2	V
Corrente de saída por porta (I_{out})	0 a 2	A
Corrente máxima de saída total ($I_{out,total}$)	4	A
Altura	70	mm
Largura	51	mm
Comprimento	100	mm
Eficiência máxima	62,7	%
Saídas	2	-

Fonte: Autor

A altura pode variar dependendo do dissipador utilizado.

O protótipo apresenta diversas características positivas, como a capacidade de fornecer uma alta corrente de saída, tensão ajustável para todos os modelos de células de íons de lítio, aplicação em todas as estruturas e boa estabilidade na corrente de carga. Entretanto, uma grande desvantagem está em sua eficiência. Conforme demonstrado nos testes realizados com uma fonte de bancada fornecendo 12 V para o circuito, observamos que a potência entregue pela fonte é de 6 W, mas a potência máxima atingida durante o processo de carga foi de 2,06 W,

resultando em uma perda de 3,94 W. Isso ocorre porque se trata de um regulador e não de um conversor de potência. Em outras palavras, a melhor tensão de alimentação para este circuito é a menor tensão de entrada possível. Assim, para uma célula com tensão de carga de 4,2 V, o aproveitamento da potência de entrada pode alcançar valores superiores a 60%.

O projeto oferece diversas possibilidades e sugere avanços futuros, como a adaptação de sua entrada para atender às saídas de uma fonte de bancada. Como mencionado, as fontes de bancada geralmente estão consideravelmente sobredimensionadas para o carregamento em correntes menores. Portanto, podemos ajustar a entrada do protótipo para que uma fonte de bancada seja responsável por fornecer energia a ele, permitindo assim aproveitar a corrente máxima de saída da fonte. Ou seja, é possível evoluir o projeto para incluir ao menos 5 saídas, por exemplo. Dessa forma, ao carregar células como a 30Q ou a 25R, poderemos utilizar toda a potência máxima que a fonte pode fornecer, sem perder o controle individual da corrente que flui para cada célula.

REFERÊNCIAS

ABVE. **100% elétricos crescem e têm recorde em setembro**. 2023. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/100-eletricos-crescem-e-tem-recorde-em-setembro/>>.

BARAK, M. An electrical centenary Georges Leclanché (1839-82). **Electronics and Power**, v. 12, n. 6, p. 184-185, 1966.

BATTERY UNIVERSITY. **BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries**. 2021. Disponível em: <<https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

BATTERY UPGRADE. B.V, B. COM PT, BraunOni. **SAMSUNG 1x INR18650-30Q bateria (3000 mAh, 3.7V)**. Disponível em: <<https://www.batteryupgrade.com.pt/shopBrowser.php?assortmentProductId=40735730>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

BLOMGREN, L. Remediation of a former nickel-cadmium battery-factory at Jungnerholmarna. **Linnaeus Eco-Tech**, p. 471–478, 20 mar. 2019.

BNEF. **Top 10 Energy Storage Trends in 2023**. 2023. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/top-10-energy-storage-trends-in-2023/#:~:text=In%202022%2C%20volume%2Dweighted%20price>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

BRENNI, Paolo et al. From Volta onwards: A variety of electrical batteries in the Pavia Museum of Electrical Technology. In: **2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONFERENCE (HISTELCON)**. IEEE, 2012. p. 1-6.

BRIDGEWATER, G. et al. A Comparison of Lithium-Ion Cell Performance across Three Different Cell Formats. **Batteries**, v. 7, n. 2, p. 38, 8 jun. 2021.

CANALYS. **Canalys Newsroom - Global smartphone shipments down 9% in Q2 2022 as demand falls**. Shanghai, Bengaluru, Singapore, Reading and Portland, 2022. Disponível em: <<https://canalys.com/newsroom/worldwide-smartphone-market-Q2-2022>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

CHAKKARAVARTHY, C.; WAHEED, A. K. ABDUL.; UDUPA, H. V. K. Zinc—air alkaline batteries — A review. **Journal of Power Sources**, v. 6, n. 3, p. 203–228, dez. 1981.

DENG, D. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. **Energy Science & Engineering**, v. 3, n. 5, p. 385–418, set. 2015.

DE SOUZA, C. C. B. M.; TENÓRIO, J. A. S. Simultaneous recovery of zinc and manganese dioxide from household alkaline batteries through hydrometallurgical processing. **Journal of Power Sources**, v. 136, n. 1, p. 191–196, 10 set. 2004.

EVLITHIUM. **What is the voltage range of LiFePO4 batteries?**. Disponível em: <<https://www.evliithium.com/lifepo4-battery-news/voltage-range-of-lifepo4-batteries.html>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

FETCENKO, M. A. et al. Recent advances in NiMH battery technology. **Journal of Power Sources**, v. 165, n. 2, p. 544–551, mar. 2007.

FOCACCIA, M.; RAFFAELLA, S. Luigi Galvani, Physician, Surgeon, Physicist: From Animal Electricity to Electro-Physiology. **Springer eBooks**, p. 145–158, 1 jan. 2007.

GRADY, H. R. Lithium metal for the battery industry. **Journal of Power Sources**, v. 5, n. 1, p. 127–135, jan. 1980.

HALL, J. C.; KOCH, M. Studies Leading to the Development of High-Rate Lithium Sulfuryl Chloride Battery Technology. **U.S. Army Elect Tech & Dvcs Laboratory**, 1 set. 1982.

HE, H.; XIONG, R.; FAN, J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. **energies**, v. 4, n. 4, p. 582-598, 2011.

INSTUTHERM. **Fonte de Alimentação Mod. FA-3030 Simétrica Digital de 2 canais, tensão até 64 Volts (modo série), corrente até 6 Ampères (modo paralelo) e 1 saída fixa de 5V/3A**. Disponível em: <<https://www.instrutherm.com.br/fonte-de-alimentac-o-mod-fa-3030-digital-simetrica-32v-5a-digital-simetrica>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

JAFARI, H.; RAHIMPOUR, M. R. Pb Acid Batteries. **Rechargeable Batteries**, p. 17–39, 13 abr. 2020.

JEYASEELAN, C. et al. Ni-Cd Batteries. **Rechargeable Batteries**, p. 177–194, 13 abr. 2020.

KIM, H.-K.; CHOI, J. H.; LEE, K.-J. A Numerical Study of the Effects of Cell Formats on the Cycle Life of Lithium Ion Batteries. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 10, p. A1769–A1778, 2019.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of batteries**. New York: Mcgraw-Hill, 2002.

LISBONA, D.; SNEE, T. A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 89, n. 6, p. 434–442, nov. 2011.

LI, M. et al. 30 Years of Lithium-Ion Batteries. **Advanced Materials**, v. 30, n. 33, p. 1800561, 14 jun. 2018.

MARINČIĆ, N. Materials balance in primary batteries. IV. Lithium batteries with organic electrolytes. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 6, n. 5, p. 463-468, 1976.

MINIPA. **Minipa do Brasil - multímetros de bancada: MDM-8045C**. Disponível em: <<https://www.minipa.com.br/categoria/2/instrumentos-de-bancada/multimetros-de-bancada/155-mdm-8045>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

NITTA, N. et al. Li-ion battery materials: present and future. **Materials Today**, v. 18, n. 5, p. 252–264, jun. 2015.

PARK, K.-J. et al. Degradation Mechanism of Ni-Enriched NCA Cathode for Lithium Batteries: Are Microcracks Really Critical? **ACS Energy Letters**, v. 4, n. 6, p. 1394–1400, 23 maio 2019.

PARK, M.; YOON, W.-S. **Characteristics of a Li/MnO₂ battery using a lithium powder anode at high-rate discharge**. v. 114, n. 2, p. 237–243, 1 mar. 2003.

PICCOLINO, M. Luigi Galvani and animal electricity: two centuries after the foundation of electrophysiology. **Trends in Neurosciences**, v. 20, n. 10, p. 443–448, 1 out. 1997.

POLITERM. **Reostato de Laboratório modelo POL-412S**. Disponível em: <<https://www.politerm.com.br/produto/reostato-de-laboratorio-modelo-pol-412s/1967187>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

PUTOIS, F. Market for nickel-cadmium batteries. **Journal of Power Sources**, v. 57, n. 1-2, p. 67–70, set. 1995.

RUETSCHI, P. Review on the lead—acid battery science and technology. **Journal of Power Sources**, v. 2, n. 1, p. 3–120, dez. 1977.

SAMSUNG SDI. Datasheet: **INR18650-25R**. 2014. Disponível em: <<https://dalincom.ru/datasheet/SAMSUNG%20INR18650-25R.pdf>>. Acesso em 14 nov. 2023.

SAMSUNG SDI. Datasheet: **INR 18650-30Q**. 2015. Disponível em: <<https://eu.nkon.nl/sk/k/30q-specs.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SAMSUNG SDI. **Introduction of INR18650-25R**. 2013. Disponível em: <<https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>>. Acesso em 14 nov. 2023.

SCHIPPER, F.; AURBACH, D. A brief review: Past, present and future of lithium ion batteries. **Russian Journal of Electrochemistry**, v. 52, n. 12, p. 1095–1121, dez. 2016.

SCHLAIKJER, C.; GOEBEL, F.; MARINČIĆ, N. **Discharge Reaction Mechanisms in Li / SOCl₂ Cells**. v. 126, n. 4, p. 513–522, 1 abr. 1979.

SCROSATI, B. History of lithium batteries. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 15, n. 7-8, p. 1623–1630, 4 maio 2011.

SHAO-HORN, Y.; OSMIALOWSKI, S.; HORN, Q. C. Nano-FeS₂ for Commercial Li/FeS₂ Primary Batteries. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 149, n. 11, p. A1499, 2002.

SHEPARD, J. **Li-ion batteries, Part 1: Building massless batteries**. 2022. Disponível em: <<https://www.batterypowertips.com/li-ion-batteries-part-1-building-massless-batteries-faq/>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SICKLE, G. R. V.. **Macromodelo L200/L200C**. 2009. Disponível em: <<https://grvs.wordpress.com/electrical-engineering/l200l200c-macromodel/>> Acesso em: 15 nov. 2023.

STMICROELECTRONICS. Datasheet: **L200CV**. 2000. Disponível em: <<https://br.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/L200CV?qs=CpW9M0hJLRllg6ve x3NElQ%3D%3D>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SUDDUTH, William M. The voltaic pile and electro-chemical theory in 1800. **Ambix**, v. 27, n. 1, p. 26-35, 1980.

TANAKA DOS SANTOS, Lucas Makoto. **Pilhas**. Todo Estudo. Disponível em: <https://www.todoestudo.com.br/quimica/pilhas>. Acesso em: 14 nov. 2023.

TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet: **INA21x Voltage Output, Low- or High-Side Measurement, Bidirectional, Zero-Drift Series, Current-Shunt Monitors**. 2008. Disponível em: <<https://www.ti.com/product/INA210?dcmp=dsproject&hqs=pf>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet: **LM317 3-Terminal Adjustable Regulator**. 1997. Disponível em: <<https://www.ti.com/product/LM317?dcmp=dsproject&hqs=pf>>. Acesso: 15 nov. 2023.

VILLALVA, M. **Armazenamento de energia: tecnologias de baterias elétricas**. 2021. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/armazenamento-de-energia-tecnologias-de-baterias-eletricas/>>. Acesso em 14 nov. 2023.

VOLTA, A. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In a letter from Mr. Alexander Volta, F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K. B. P. R. S. **Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 1, p. 27–29, 31 dez. 1832. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspl.1800.0016>>.

VON HANDORF, D. R.; CROTTY, D. E. The Baghdad Battery: Myth or reality?. **Plating and surface finishing**, v. 89, n. 5, p. 84-87, 2002.

WHITTINGHAM, M. Stanley. History, evolution, and future status of energy storage. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. Special Centennial Issue, p. 1518-1534, 2012.

WOLLINGER, L. **Baterias de Lítio-Íon: Um guia completo**. 2020. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/baterias-de-litio-ion-um-guia-completo/>>. Acesso em 14 nov. 2023.

XING, H. et al. **Ambient Lithium–SO₂ Batteries with Ionic Liquids as Electrolytes**. v. 126, n. 8, p. 2131–2135, 20 jan. 2014.

ZHANG, R. et al. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1820, 11 jul. 2018.

ZUBI, G. et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 292–308, jun. 2018.