

# Guia Prático de Projeto de Packs de Baterias

Fundamentos, dimensionamento, arquitetura e proteção para aplicações industriais



— Eng. Aldo Michelini —

— S.T.A. Sistemas e Tecnologia Aplicada —

# **Guia Prático de Projeto de Packs de Baterias**

Fundamentos, dimensionamento, arquitetura e proteção para  
aplicações industriais

© 2026 • S.T.A. Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA.

Todos os direitos reservados. Exceto para usos não comerciais, nenhuma parte deste livro pode ser reproduzida ou transmitida de qualquer forma ou por qualquer meio sem a permissão escrita do autor.

Capa: Aldo Michelini

Revisão: Beatriz Silva

# Informações Importantes

Isenção de responsabilidade, termos de uso e orientações de segurança

**1. Natureza Informativa:** Este ebook tem caráter estritamente educativo e informativo, consolidando práticas gerais de engenharia e diretrizes da Indústria 4.0. Ele não substitui consultoria técnica especializada, projetos de engenharia assinados ou a supervisão de profissionais habilitados.

**2. Riscos Inerentes:** O projeto e a montagem de packs de baterias de lítio envolvem riscos críticos, incluindo, mas não se limitando a curtos-circuitos, incêndios, explosões e exposição a materiais tóxicos. O manuseio desses sistemas exige infraestrutura adequada e equipamentos de proteção individual (EPIs) específicos.

**3. Limitação de Responsabilidade:** Os autores, editores e colaboradores não se responsabilizam por quaisquer:

- **Erros ou Omissões:** Embora esforços exaustivos tenham sido feitos para garantir a precisão dos dados, cálculos e normas citadas, a tecnologia de baterias evolui rapidamente, e imprecisões podem ocorrer.
- **Danos Materiais ou Pessoais:** Não haverá responsabilização por danos diretos, indiretos, incidentais ou consequentes (incluindo perda de lucros ou interrupção de produção) resultantes do uso ou da incapacidade de uso das informações contidas neste material.
- **Falhas de Componentes:** A performance final de um pack depende da qualidade dos componentes de terceiros (células, BMS, barramentos) e da execução técnica, variáveis que fogem ao controle deste guia.

**4. Conformidade Legal:** É de inteira responsabilidade do leitor garantir que seus projetos e instalações estejam em conformidade com as normas locais (ABNT, NR-10, NR-12), certificações internacionais (UL, IEC, UN) e legislações ambientais vigentes.

**Ao prosseguir com a leitura e aplicação destes conceitos, o usuário assume total responsabilidade pelos riscos e resultados de suas atividades.**

Apesar de todo esforço que foi feito para fornecer neste livro informações as mais precisas possíveis, nem o autor nem a S.T.A. se responsabilizam por eventuais erros, omissões ou danos decorrentes de seu uso.

## 5. Aviso de Uso de Ferramentas de IA

Informamos que parte do conteúdo e da organização deste guia técnico foi gerada e assistida por modelos de Inteligência Artificial. Este recurso foi utilizado para potencializar a clareza técnica e a análise de grandes volumes de parâmetros industriais. Ressaltamos que todos os conceitos de segurança, cálculos e diretrizes de fabricação foram revisados e validados por especialistas para garantir a integridade das informações apresentadas.

## Agradecimentos

Este livro não teria sido escrito sem o apoio da **S.T.A. Sistemas e Tecnologia Aplicada**, que além de patrocinar, cedeu suas instalações, equipamentos e vários de seus produtos para que pudessem ser fotografados e testados, permitindo a obtenção de informações relevantes para esta publicação.

Agradeço aos colegas da S.T.A. que direta ou indiretamente contribuíram para esta obra. Agradeço ao Eng. Israel Minghin, sócio da S.T.A. pelas longas conversas, ideias e sugestões.

*Eng. Aldo Michelini*



**S.T.A. – Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA.**

Rua Matrix, 35 – Cotia – SP

CEP 06714-360

Telefone (11) 4617-8530

E-mail: [sta@sta-eletronica.com.br](mailto:sta@sta-eletronica.com.br)

[www.sta-eletronica.com.br](http://www.sta-eletronica.com.br)

# Sumário

<b>Introdução</b> .....	<b>11</b>
<b>Capítulo 1: Especificações Técnicas</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Unidades elétricas usadas em packs de baterias</b> .....	<b>12</b>
1.1.1 Corrente elétrica.....	12
1.1.2 Tensão elétrica.....	13
1.1.3 Capacidade .....	14
1.1.4 Taxa C.....	15
1.1.5 Resistência interna .....	16
1.1.6 Potência elétrica .....	18
1.1.7 Energia .....	20
1.1.8 Diferença entre corrente (A) e capacidade (Ah) .....	21
<b>1.2 Especificações Técnicas de um Pack de Baterias</b> .....	<b>21</b>
1.2.1 Especificação da Janela de Tensão – Volts (V) .....	21
1.2.2 Especificação da Capacidade Real (Capacidade Útil x DoD) – Ampère-hora (Ah) ...	22
1.2.3 Especificação da Corrente .....	22
1.2.4 Especificação dos Fios de Saída e Conector .....	23
1.2.5 Especificação da Temperatura de Operação .....	23
1.2.6 Especificação do nível de vibração .....	23
1.2.7 Especificação do tamanho máximo .....	24
1.2.8 Aplicação .....	26
1.2.9 Tipo de Célula.....	26
1.2.10 Exemplo de especificação técnica de packs de baterias .....	28
<b>Capítulo 2: Fundamentos das Células</b> .....	<b>30</b>
<b>2.1 Tipos de Química: Li-íon (NMC/NCA), LiFePO4 e LTO</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2 Formatos Comuns: Cilíndricas, Prismáticas e Pouch</b> .....	<b>33</b>
<b>2.3 Entendendo o Datasheet: Capacidade, Tensão e Taxa de Descarga (C-rate)</b> .....	<b>37</b>
<b>2.4 Como selecionar as células (match)</b> .....	<b>39</b>

<b>Capítulo 3: Arquitetura do Pack</b> .....	<b>41</b>
<b>3.1 Elementos principais de um pack de baterias</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2 Associação em Série (S)</b> .....	<b>44</b>
<b>3.3 Associação em Paralelo (P)</b> .....	<b>48</b>
<b>3.4 Seleção de Células Ligadas em Paralelo</b> .....	<b>51</b>
<b>3.5 Ligações em Paralelo e em Série</b> .....	<b>57</b>
<b>3.6 O Papel Crítico do BMS (Battery Management System)</b> .....	<b>59</b>
<b>Capítulo 4: Projeto de Packs de Baterias - Cálculos</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1 Cálculo da tensão</b> .....	<b>60</b>
<b>4.2 Cálculo da corrente</b> .....	<b>60</b>
<b>4.3 Cálculo da capacidade</b> .....	<b>61</b>
<b>4.4 Cálculo da potência</b> .....	<b>62</b>
<b>4.5 Cálculo da energia</b> .....	<b>62</b>
<b>4.6 Cálculo do tempo de duração da energia</b> .....	<b>63</b>
<b>4.7 Cálculo da corrente média em função do ciclo de trabalho</b> .....	<b>64</b>
<b>Capítulo 5: Placa de Proteção (BMS – Battery Management System)</b> .....	<b>67</b>
<b>5.1 Funções Vitais e Arquitetura de Proteção</b> .....	<b>67</b>
<b>5.2 Balanceamento de Células</b> .....	<b>70</b>
<b>5.3 Proteção contra temperatura excessiva</b> .....	<b>78</b>
<b>5.4 Comunicação e Integração Industrial (CAN Bus, RS485 e Bluetooth)</b> .....	<b>81</b>
<b>5.5 MOSFETs vs. Contatores Industriais e o Circuito de Pré-Carga</b> .....	<b>82</b>
<b>5.6 Especificação de placas PCM</b> .....	<b>84</b>
<b>Capítulo 6: Dimensionamento dos Fios, Conexões e Barramentos</b> .....	<b>86</b>
<b>6.1 Dimensionamento dos fios de saída</b> .....	<b>86</b>
<b>6.2 Dimensionamento dos fios de balanceamento</b> .....	<b>90</b>
<b>6.2.1 Dimensionamento dos Condutores de Balanceamento Passivo</b> .....	<b>90</b>

6.2.2 Dimensionamento dos Condutores de Balanceamento Ativo .....	91
6.2.3 O Fenômeno do Erro de Leitura .....	92
6.2.4 Estratégias de Engenharia para Mitigação .....	93
6.3 Dimensionamento da fita metálica para conectar as células .....	93
6.3.1 Capacidade de Corrente por Dimensão .....	93
6.3.2 Regra Prática de Dimensionamento .....	94
6.3.3 Considerações Cruciais para o Pack .....	94
6.3.4 Como Identificar o Material .....	94
6.4 Dimensionamento dos barramentos de cobre .....	94
<b>Capítulo 7: Acessórios de Proteção .....</b>	<b>96</b>
7.1 Proteção de packs de baterias com poliswitch – PTC .....	98
7.2 Proteção de packs de baterias com NTC ou termistores .....	100
7.3 Proteção de packs de baterias com termostatos .....	101
7.4 Proteção de packs de baterias com fusíveis .....	102
7.5 Proteção de packs de baterias com fusistores .....	105
7.6 Proteção de packs de baterias com fusíveis térmicos (TCO) .....	108
<b>Capítulo 8: Construção e Montagem .....</b>	<b>111</b>
8.1 O Elemento Base: Seleção de Células .....	111
8.1.1 Análise de Resistência Interna (IR) .....	111
8.1.2 Homogeneidade de Capacidade Real .....	113
8.1.3 Agrupamento Inteligente .....	114
8.1.4 Inspeção de Autodescarga (Self-Discharge Test) .....	114
8.1.5 Inspeção de Voltagem .....	114
8.2 Estrutura Mecânica: Suportes e Isolamento .....	115
8.2.1 Suportes Plásticos (Cell Holders / Spacers) .....	115
8.2.2 O Perigo Oculto no Topo: Papel Cevada (Barley Paper) .....	116
8.2.3 Gerenciamento de Vibração e Fixação Interna .....	117
8.2.4 Barreiras de Isolamento Térmico Interno .....	117

<b>8.3 Conexões Elétricas: A Solda Ponto.....</b>	<b>118</b>
8.3.1 Por que a Solda Ponto é Obrigatória? .....	119
8.3.2 O Material Correto: Níquel Puro vs. Aço Niquelado .....	120
8.3.3 Dimensionamento Prático da Fita de Níquel .....	121
8.3.4 Parâmetros para uma Solda Perfeita .....	121
<b>8.4 O Cérebro do Pack: Instalação do BMS.....</b>	<b>122</b>
8.4.1 A Nomenclatura dos Terminais.....	122
8.4.2 A Sequência Obrigatória de Conexão (Regra de Ouro).....	123
8.4.3 Diferença Prática: BMS Hardware vs. Smart BMS .....	124
8.4.4 Isolamento Térmico e Mecânico da Placa .....	124
<b>8.5 Acessórios de proteção .....</b>	<b>124</b>
<b>8.6 Acabamento e Blindagem Exterior .....</b>	<b>125</b>
<b>8.7 Rotulagem e Especificação Técnica .....</b>	<b>127</b>
<b>8.8 Instrumentos de medição, equipamentos e segurança .....</b>	<b>127</b>
8.8.1 Instrumentos de Medição, Diagnóstico e Calibração.....	128
8.8.2 Maquinário de Fusão e Termofixação.....	128
8.8.3 Insumos Técnicos e Homologação de Materiais .....	129
8.8.4 Segurança da Bancada .....	130
8.8.5 Checklist de Controle de Qualidade (CQ) e Inspeção Final .....	131
<b>Capítulo 9: Manufatura Avançada.....</b>	<b>134</b>
9.1 Triagem Automatizada: Classificação por Resistência Interna (IR) e Tensão de Circuito Aberto (OCV) .....	134
9.2 Soldagem Industrial: Processos a Laser, Ultrassom e Resistência Robotizada ..	136
9.3 Inspeção de Qualidade: Testes de estanqueidade, testes dielétricos (Hi-Pot) e Visão Computacional .....	137
9.4 Checklist Geral de Inspeção Final (Aprovação para Uso) .....	139
9.5 Rastreabilidade: Integração de dados de produção e serialização de células....	140
9.6 Manual de Garantia e Termos de Uso.....	141

<b>Capítulo 10: Gerenciamento Térmico e Proteção Física .....</b>	<b>142</b>
10.1 A Janela Térmica Operacional do Lítio-Íon .....	142
10.2 Fontes de Geração de Calor no Pack .....	142
10.3 Estratégias de Dissipação Passiva.....	143
10.4 Estratégias de Dissipação Ativa.....	143
10.5 Arquitetura de Monitoramento Térmico .....	144
<b>Capítulo 11: Protocolos de Testes .....</b>	<b>147</b>
11.1 O Teste de Ciclo de Capacidade Real (Carga e Descarga Completa).....	147
11.2 O Teste de Estresse por Corrente Máxima (Load Stress Test).....	149
11.3 Teste de Validação dos Limites de Proteção do BMS.....	149
11.4 Rastreamento e Mapeamento Térmico Dinâmico .....	150
11.5 O Teste de Envelhecimento Térmico Estático (Burn-in / Shelf Test).....	151
<b>Capítulo 12: O Ciclo de Vida do Pack de Baterias (Life Cycle Management).....</b>	<b>152</b>
12.1 O que define a "Vida Útil" de um Pack?.....	152
12.2 Mecanismos Químicos de Degradação (O Envelhecimento) .....	152
12.3 Fatores que Aceleram a Degradação (Como Evitar) .....	153
12.4 As Fases da Vida de um Pack de Baterias.....	153
12.5 Destinação Final e Reciclagem Coercitiva .....	154
<b>Capítulo 13: Aplicações Práticas (Estudos de Caso) .....</b>	<b>155</b>
13.1 Projeto 1 - 12V - 7Ah - uso de software de projeto .....	155
13.2 Projeto 1 – 12V – 10AH – projeto manual.....	162
<b>Capítulo 14: Avaliação de Fornecedores .....</b>	<b>166</b>
<b>Capítulo 15: Segurança.....</b>	<b>170</b>
15.1 visão geral sobre a segurança das baterias de lítio íon.....	170
15.2 dispositivos de proteção integrados à célula .....	174
15.3 dispositivos de proteção externos à célula .....	178

15.4 tipos de falhas nas baterias de lítio íon .....	179
15.4.1 falhas não energéticas .....	179
15.4.2 fuga térmica .....	181
15.4.3 falhas energéticas .....	184
15.4.3.1 Abuso térmico .....	184
15.4.3.2 Abuso mecânico .....	185
15.4.3.3 Abuso elétrico .....	187
15.4.3.4 Sobrecarga .....	187
15.4.3.5 Curto-circuito externo .....	188
15.4.3.6 Excesso de descarga .....	188
15.4.3.7 Defeitos de fabricação .....	189
15.5 ciclos de vida de células de lítio íon .....	192
15.6 transporte seguro das baterias de lítio .....	195
15.7 armazenagem segura .....	198
15.8 normas de segurança .....	199
15.9 orientações básicas de segurança .....	201
<b>Capítulo 16: Segunda Vida .....</b>	<b>203</b>
16.1 Second Life: Estratégias para Reaproveitamento Estacionário.....	203
16.2 Métricas, Ensaio de Laboratório e Modelos de Negócio em Segunda Vida.....	204
16.2.1 Análise de Impedância por espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) .....	204
16.2.2 Monitoramento da taxa de autodescarga estática progressiva .....	205
16.3 O Comportamento Dinâmico do Lítio Envelhecido .....	205
16.4 Cenário Econômico e Estudo de Caso: Novo vs. Segunda Vida .....	205
16.5 Barreiras Regulatórias e a Logística Reversa .....	206
<b>Glossário .....</b>	<b>207</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>216</b>
<b>Sobre a STA .....</b>	<b>218</b>

## Introdução

Seja para mobilidade elétrica, sistemas de armazenamento solar ou eletrônicos portáteis, o **pack de baterias** é o componente determinante para o sucesso de qualquer projeto moderno. No entanto, sua construção vai muito além do simples agrupamento de células; exige um equilíbrio preciso entre densidade energética, segurança térmica e gerenciamento eletrônico.

O cenário industrial contemporâneo exige soluções de energia que unam alta densidade energética, confiabilidade operacional e conformidade rigorosa com normas de segurança. Este ebook foi desenvolvido como um guia técnico avançado para engenheiros, projetistas e gestores de P&D que buscam dominar o ciclo de vida completo do projeto de packs de baterias de lítio.

Diferente de abordagens superficiais, este material foca nos pilares da engenharia de sistemas de baterias, abordando os desafios críticos da integração entre células, eletrônica de controle e gestão térmica.

Este ebook foi desenvolvido para servir como um guia técnico objetivo. Aqui, abordaremos os pilares fundamentais da montagem de packs: desde a seleção criteriosa de células e cálculos de dimensionamento, até a integração estratégica do BMS (Battery Management System). O objetivo é fornecer a base necessária para que você projete e monte sistemas de energia robustos, eficientes e, acima de tudo, seguros.

# Capítulo 1: Especificações Técnicas

## 1.1 Unidades elétricas usadas em packs de baterias

As baterias possuem alguns parâmetros básicos que determinam o seu desempenho:

- Corrente Elétrica
- Tensão Elétrica ou Voltagem
- Capacidade
- Taxa C
- Resistência Interna
- Potência
- Energia

Muitos usuários de baterias não têm conhecimento de eletricidade. Para aqueles que não conhecem os conceitos básicos de eletricidade iremos descrever resumidamente o que cada um desses parâmetros representa e como influenciam no desempenho das baterias.

### 1.1.1 Corrente elétrica

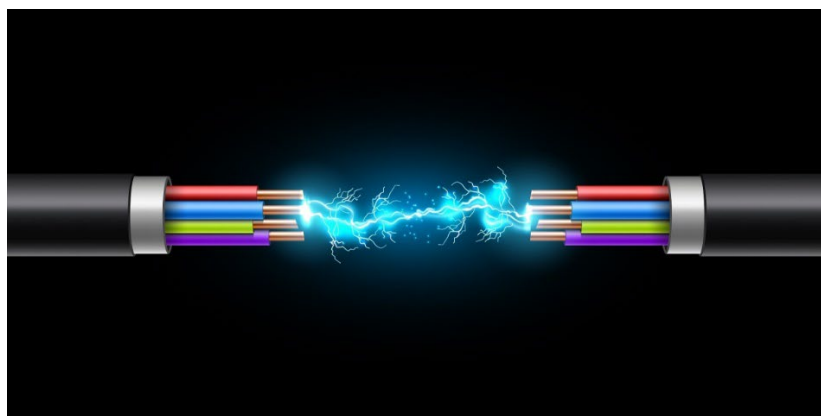


Figura 1 - Corrente elétrica

Corrente elétrica, é um movimento ordenado de cargas elétricas dentro de um fio de metal. É semelhante a uma corrente de água dentro de uma mangueira. A corrente elétrica é medida em Ampère – abreviada por A. Um miliampère é igual a um Ampère dividido por 1000 (abreviado por mA).

### 1.1.2 Tensão elétrica

Uma corrente para se estabelecer em um fio, precisa de uma força externa, ou seja, de algum tipo de ação externa que “empurre” as cargas elétricas e as coloque em movimento, vencendo a resistência dos fios e da carga elétrica. Fazendo uma comparação com um sistema de água, para que haja circulação de água, é necessária uma pressão. Essa pressão vem da caixa de água. É o peso da água que faz a água circular.

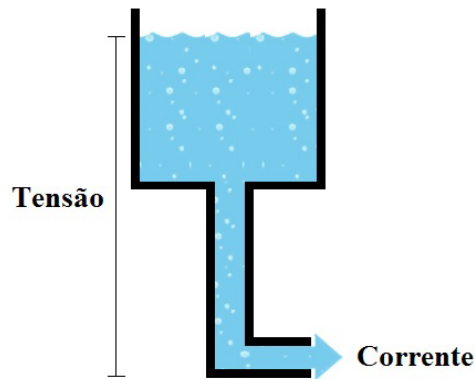


Figura 2 - Tensão elétrica

Essa pressão externa ou força externa é denominada tensão elétrica ou voltagem. O equipamento que gera essa força ou pressão externa chama-se gerador. Uma bateria nada mais é do que um gerador elétrico. A bateria gera tensão elétrica. A tensão elétrica é medida em Volts – abreviada por V. Quando uma carga (receptor) é ligada na bateria, a tensão da bateria provoca uma corrente. Essa carga pode ser uma lâmpada, um telefone sem fio, um celular. A corrente que vai circular depende da tensão e da carga.

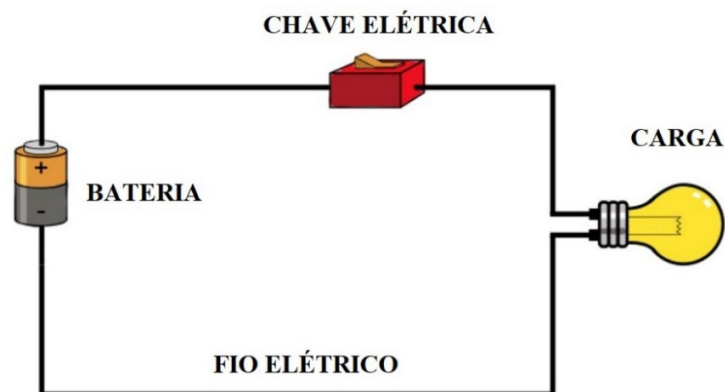


Figura 3 - Circuito elétrico básico

**As tensões usuais para os principais tipos de baterias primárias são:**

- Baterias de zinco carbono – 1,5V
- Baterias alcalinas – 1,5V
- Baterias de lítio-dióxido de manganês –  $\text{LiMnO}_2$  – 3V
- Baterias de lítio-cloreto de tionila –  $\text{LiSOCl}_2$  – 3,6V
- Baterias de lítio-bissulfeto de ferro –  $\text{LiFeS}_2$  – 1,5V

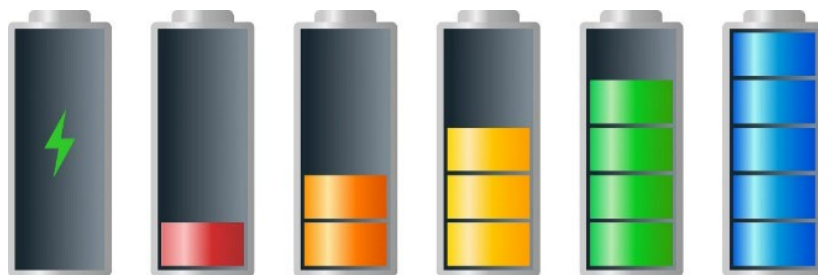
**As tensões usuais para os principais tipos de baterias recarregáveis são:**

- Baterias de NiCd – 1,2V
- Baterias de NiMh – 1,2V
- Baterias de chumbo-ácido – 2, 4, 6 ou 12V
- Baterias de Lítio-íon – 3,6V ou 3,7V
- Baterias de Lítio-Ferro ou  $\text{LiFePO}_4$  – 3,2V
- Baterias de Titanato de Lítio ou LTO – 2,8V

### 1.1.3 Capacidade

A capacidade de uma bateria é a corrente que se pode tirar de uma bateria num dado período ou em outras palavras, quanto maior é a capacidade da bateria, maior é a energia que se pode tirar dela. Mede-se em ampère-hora (Ah) ou miliampère-hora (abreviada mAh).

Por exemplo, uma bateria de 1.300 mAh pode alimentar uma carga com 65 mA durante 20 horas ( $65 \text{ mA} \times 20 \text{ horas} = 1.300 \text{ mAh}$ ). Da mesma forma, uma bateria de 1.300 mAh pode alimentar uma carga com 13 mA durante 100 horas ( $13 \text{ mA} \times 100 \text{ horas} = 1.300 \text{ mAh}$ ).



**Figura 4 - Indicador e capacidade da bateria**

### 1.1.4 Taxa C

A energia de uma bateria é liberada através da corrente elétrica que flui dela, para o equipamento que ela alimenta. A corrente elétrica que flui da bateria, é medida em ampères. Para baterias pequenas, a corrente é medida em miliampère.

A capacidade de uma bateria é proporcional à energia contida nela.

Quanto maior a capacidade, quanto mais ampères-hora ou miliampère hora, maior é a energia armazenada na bateria.

A corrente de uma bateria, também pode ser medida através da Taxa C (ou C rate em inglês).

A letra C indica a capacidade da bateria. Uma corrente de 1C indica uma corrente que é numericamente igual à capacidade da bateria.

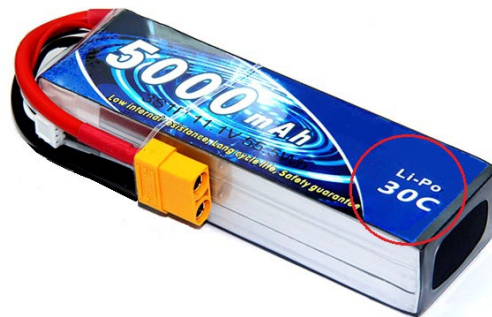


Figura 5 - Taxa C da bateria

Para uma bateria de 2000 miliampère hora, 1C, significa uma corrente de 2000 miliampère, ou 2 ampères. 2C, significa uma corrente de 4000 miliampère, ou 4 ampères. 10C, significa uma corrente de 20.000 miliampères ou 20 ampères, 20 C, significa uma corrente de 40.000 miliampères ou 40 ampères, e assim por diante.

Os fabricantes informam quatro valores de taxa C para a bateria: carga padrão, carga máxima, descarga padrão e descarga máxima ou de pico.

Quanto maior a taxa C de carga, mais rápida será a carga da bateria, quanto maior a taxa C de descarga, mais rápida será a descarga da bateria.

### 1.1.5 Resistência interna

A tensão elétrica medida nos terminais de uma de uma bateria varia quando ela está em vazio e quando ela está alimentando uma carga.

Em vazio a tensão é sempre maior do que em carga. Em carga a tensão nos terminais da bateria cai.

Os efeitos desta queda de tensão são similares aos de uma resistência em série com a bateria a qual se denomina resistência interna da bateria.

O circuito elétrico simplificado equivalente a uma bateria é mostrado na figura 6.

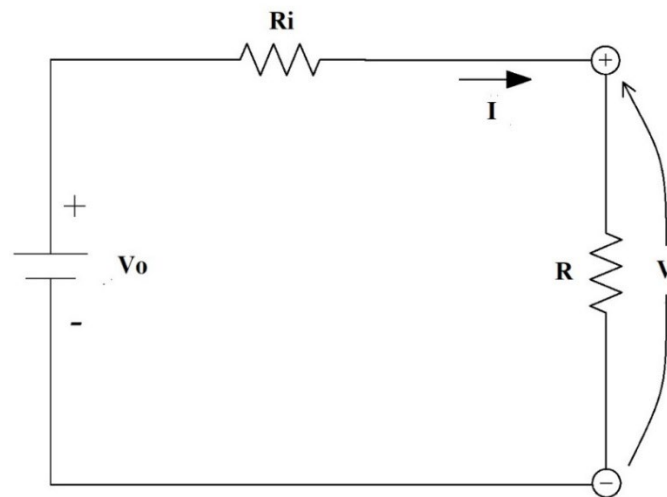


Figura 6 - Circuito elétrico equivalente da bateria (simplificado)

Neste circuito temos:

- **$V_0$  = Tensão da bateria em vazio**
- **$V$  = Tensão nos terminais da bateria em carga**
- **$R_i$  = Resistência interna da bateria**
- **$R$  = Resistência da carga**
- **$I$  = Corrente da bateria**

A Lei de Ohm estabelece uma relação entre as grandezas elétricas: tensão ( $V$ ), corrente ( $I$ ) e resistência ( $R$ ) em um circuito.

A partir de observações, concluiu-se que o valor de corrente que circula em um circuito pode ser encontrado dividindo-se o valor de tensão aplicada pela sua resistência.

Transformando esta afirmação em equação matemática, tem-se a Lei de Ohm:

$$I = V / R$$

Utiliza-se a Lei de Ohm para determinar os valores de tensão (V), corrente (I) ou resistência (R) em um circuito.

Fórmula básica:  $I = V / R$

Fórmulas derivadas:  $R = V / I$  e  $V = R \times I$

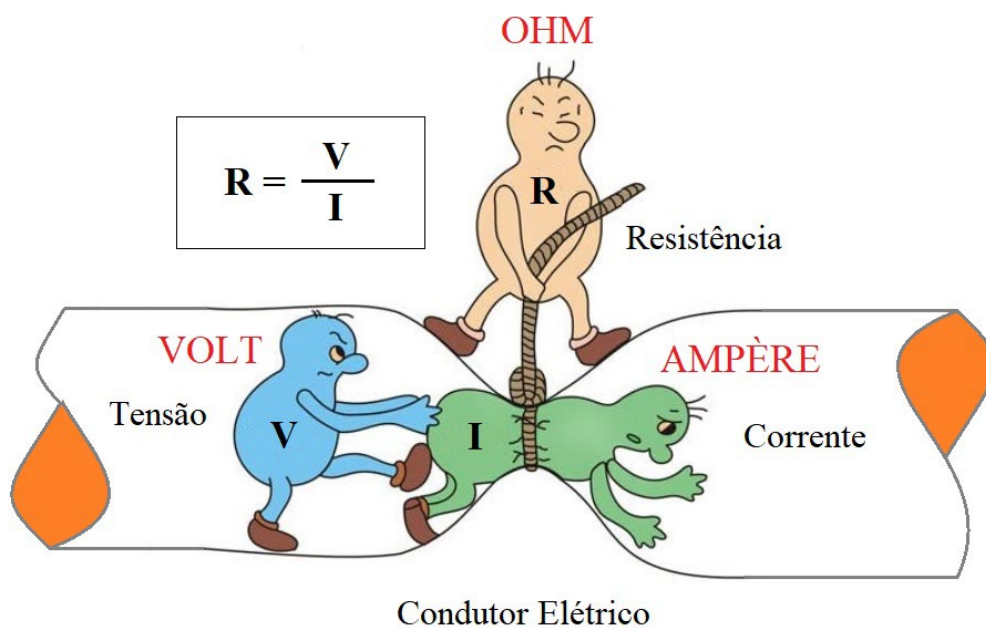


Figura 7 - Lei de Ohm

Para que as equações decorrentes da Lei de Ohm sejam utilizadas, os valores das grandezas elétricas devem ser expressos nas unidades fundamentais:

- Tensão em volts (V)
- Corrente em ampères (A)
- Resistência em ohms ( $\Omega$ )

Como exemplo, no circuito da figura 6, se a tensão em vazio da bateria é de 3,7V, a resistência interna da bateria é 100mΩ (ou 0,1Ω) e a resistência da carga é 0,9Ω, teríamos a seguinte corrente:

$$I = V/R = 3,7 / (0,1+0,9) = 3,7 / 1 = 3,7A$$

A queda de tensão na resistência interna da bateria seria:

$$V = R \times I = 0,1 \times 3,7 = 0,37V$$

Ou seja, a tensão nos terminais da bateria estando em carga seria:

$$3,7V - 0,37V = 3,33V$$

### 1.1.6 Potência elétrica

Potência é um conceito que está ligado à ideia de força, intensidade sonora, intensidade luminosa e mesmo gasto de energia num período de tempo.

Ao passar por uma carga instalada em um circuito, a corrente elétrica gerada pela bateria produz, entre outros efeitos, calor, luz e movimento.

Esses efeitos são denominados de trabalho.

O trabalho de transformação de energia elétrica em outra forma de energia é realizado pelo consumidor ou pela carga.

Ao transformar a energia elétrica, o consumidor realiza um trabalho elétrico.

O tipo de trabalho depende da natureza do consumidor de energia. Um aquecedor, por exemplo, produz calor; uma lâmpada, luz; um ventilador, movimento.

A capacidade de cada consumidor produzir trabalho, em determinado tempo, a partir da energia elétrica é chamada de potência elétrica.

Para dimensionar corretamente cada componente em um circuito elétrico é preciso conhecer a potência requerida.

Potência elétrica é a capacidade de realizar um trabalho numa unidade de tempo, a partir da energia elétrica. A unidade de medida da potência elétrica é o watt, simbolizado pela letra W. Um watt (1W) corresponde à potência desenvolvida no tempo de um segundo em uma carga, alimentada por uma tensão de 1V, na qual circula uma corrente de 1A. A unidade de medida da potência elétrica watt tem múltiplos e submúltiplos:

$$1W = 1000 \text{ mW} = 0,001 \text{ KW}$$

A potência elétrica (P) de uma carga alimentada por uma bateria depende da tensão aplicada e da corrente que circula nos seus terminais.

Matematicamente, essa relação é representada pela seguinte fórmula:

$$P = V \times I$$

Nessa fórmula V é a tensão entre os terminais da carga expressa em volts (V); I é a corrente circulante, expressa em ampères (A) e P é a potência dissipada expressa em watts (W).

Voltando ao exemplo da figura 13, a potência consumida na carga é de:

$$P = V \times I = 3,33 \times 3,7 = 12,32W$$

Além desta fórmula básica temos outras fórmulas derivadas:

$$I = P / V$$

$$V = P / I$$

Muitas vezes é preciso calcular a potência de um componente e não se dispõe da tensão e da corrente.

Quando não se dispõe da tensão (V) não é possível calcular a potência pela equação  $P = V \times I$ . Esta dificuldade pode ser solucionada com auxílio da Lei de Ohm, ou seja,

$$V = R \times I$$

$$P = V \times I = R \times I \times I$$

Assim sendo, pode-se dizer que:

$$P = R \times I^2$$

No exemplo da figura 6, temos:  $P = 0,9 \times 3,7 \times 3,7 = 12,32W$

Esta equação pode ser usada para determinar a potência de um componente.

É conhecida como equação da potência por efeito joule, que é o efeito térmico produzido pela passagem de corrente elétrica através de uma resistência.

Ainda usando a lei de ohm, temos mais uma fórmula derivada para cálculo da potência:

$$P = V \times I = V \times V / R$$

$$P = V^2 / R$$

### 1.1.7 Energia

A energia contida numa bateria pode ser calculada pela fórmula:

$$E = P \times T$$

Onde:

- **E = Energia (Wh)**
- **P = Potência (W)**
- **T = Tempo (h)**

A unidade de medida da energia elétrica é o Wh (watt-hora). Uma bateria que é capaz de fornecer 10W por 1 hora tem uma energia de 10Wh. Se considerarmos que:

$$P = V \times I$$

Temos a seguinte fórmula para cálculo da energia:

$$E = P \times T = V \times I \times T$$

Se considerarmos que:

$$C = I \times T$$

Onde:

- **C = Capacidade (Ah)**
- **I = Corrente (A)**
- **T é o Tempo (h)**

Temos que:

$$E = V \times I \times T = V \times C$$

No exemplo da figura 6, se a bateria consegue manter a corrente de 3,7 A durante 2 horas, podemos calcular:

$$C = I \times T = 3,7 \times 2 = 7,4 \text{ Ah}$$

$$E = V \times C = 3,33 \times 7,4 = 24,64 \text{ Wh}$$

### **1.1.8 Diferença entre corrente (A) e capacidade (Ah)**

Qual a diferença entre ampère (A), e ampère-hora (Ah)? Muitas pessoas confundem A com Ah. Ou seja, confundem a corrente da bateria e sua capacidade.

A energia elétrica produzida nas usinas hidrelétricas, nucleares, eólicas ou térmicas, chega até nós através da corrente que circula nas linhas de transmissão.

A corrente que passa num fio elétrico é medida em ampères. Quanto mais ampères, maior é a carga elétrica que passa no fio.

Por outro lado, o Ampère-hora é uma unidade de medida da capacidade da bateria que é proporcional à energia contida nela.

Por exemplo, uma bateria selada de chumbo-ácido que tem uma capacidade de 7 ampères-hora, é capaz de fornecer 0,35 A durante 20 horas, o que dá 7 A.h ( $0,35 \text{ A} \times 20 \text{ horas}$ )

Mas ela também pode fornecer 0,7 A por 10 horas ( $0,7 \text{ A} \times 10 \text{ horas} = 7 \text{ A.h}$ ). Ou ainda, pode fornecer 1 A por 7 horas ( $1 \text{ A} \times 7 \text{ horas} = 7 \text{ A.h}$ ). Ou ainda, pode fornecer 7 A por 1 hora ( $7 \text{ A} \times 1 \text{ hora} = 7 \text{ A.h}$ ). Esses dados não levam em conta a perda de rendimento da bateria conforme a corrente aumenta, pela dissipação de calor.

Em resumo, ampère é usado para medir correntes elétricas. Ampère-hora é usado para medir a capacidade da bateria.

## **1.2 Especificações Técnicas de um Pack de Baterias**

Para projetar um pack que atenda aos requisitos de carga, o ponto de partida é ter uma boa especificação técnica onde são especificados os principais parâmetros a serem considerados nos cálculos do pack de baterias.

### **1.2.1 Especificação da Janela de Tensão – Volts (V)**

Diferente de eletrônicos simples, equipamentos industriais têm uma "janela de tensão" rígida. Os parâmetros a serem considerados são:

- Tensão Máxima: Tensão com o pack 100% carregado. O equipamento suporta essa tensão de pico?
- Tensão Nominal - Onde a maior parte do trabalho ocorre.
- Tensão Mínima - O ponto onde o equipamento desliga por subtensão. O equipamento funciona com essa tensão mínima?

Exemplo: Um motor de 48V pode parar de funcionar se a tensão cair abaixo de 42V ou pode queimar se a tensão ultrapassar 60V.

Se você usar um pack de baterias com 16 células de Lítio-Ferro - LiFePO<sub>4</sub>, em série, onde cada célula tem 3,6V quando totalmente carregada, 3,2V de tensão nominal e 2,8V quando descarregada, teríamos:

Pack totalmente carregado: Tensão máxima =  $16 \times 3,6V = 57,6V$

Pack em condições nominais de trabalho: Tensão Nominal =  $16 \times 3,2V = 51,2V$

Pack descarregado: Tensão mínima =  $16 \times 2,8V = 44,8V$

Nessas condições o pack de baterias atende as necessidades de alimentação do motor em questão.

### 1.2.2 Especificação da Capacidade Real (Capacidade Útil x DoD) –

#### Ampère-hora (Ah)

Qual a capacidade que o pack de baterias deve ter (mAh ou Ah)?

Na indústria, nunca se usa 100% da energia de uma bateria. Isso é chamado de DoD (Depth of Discharge - Profundidade da descarga).

- **Regra de Ouro:** Para baterias Li-ion/Lítio Ferro, recomenda-se um DoD de 80%. Isso dobra ou triplica a vida útil do pack em comparação ao uso de 100%.
- **Cenário:** Se sua máquina consome 100Ah por turno, você deve projetar um pack de pelo menos 125Ah (para usar 80%) e aplicar um fator de folga para o envelhecimento da bateria ao longo dos anos.

### 1.2.3 Especificação da Corrente

Para especificar um pack de baterias é necessário definir:

- Corrente média na descarga em regime contínuo, o que vai determinar o aquecimento das células, fios e conexões.
- Corrente de Pico que é o valor máximo de corrente que o pack de baterias deve fornecer. Esse valor é necessário para saber a Taxa C da célula escolhida. Se o pack é de 100Ah e o motor puxa 200A em subidas, o pack opera a 2C.

As correntes de carga do pack de baterias normalmente são menores que as correntes de descarga, mas para confirmar é necessário também saber:

- Corrente média na carga
- Corrente de pico na carga

*Nota:* Se você dobrar a corrente, o calor gerado no pack aumenta quatro vezes.

#### **1.2.4 Especificação dos Fios de Saída e Conector**

Dependendo da corrente de descarga ou de carga do pack, deve-se especificar a bitola dos fios de saída e conector.

No Capítulo 6 deste livro você encontra como fazer o dimensionamento dos fios, conexões e barramentos.

#### **1.2.5 Especificação da Temperatura de Operação**

As células recarregáveis de lítio normalmente são para temperatura máxima de 60 °C.

Especificar a temperatura de operação em um pack de baterias é crucial por três motivos principais que afetam diretamente a "saúde" e a segurança do sistema:

- **Desempenho e Eficiência:** O frio extremo aumenta a resistência interna, reduzindo a capacidade da bateria de entregar energia (por isso o celular descarrega mais rápido no frio). Já o calor excessivo pode aumentar a autodescarga.
- **Vida Útil (Degradação):** Baterias são baseadas em reações químicas. Operar acima da temperatura recomendada acelera o desgaste dos componentes internos, reduzindo drasticamente o número de ciclos de carga e descarga que ela suporta.
- **Segurança (Fuga Térmica):** Se uma bateria esquenta demais, ela pode entrar em um estado chamado *thermal runaway* (fuga térmica), onde o calor gera mais calor em um ciclo imparável, podendo levar a vazamentos, incêndios ou explosões.

#### **1.2.6 Especificação do nível de vibração**

Especificar se um pack de baterias está sujeito a vibrações é essencial porque o estresse mecânico contínuo pode comprometer tanto a integridade física quanto o desempenho químico das células.

Os principais motivos para essa especificação incluem:

- **Integridade das Conexões:** Vibrações constantes podem causar fadiga em soldas de ponto (spot welds), afrouxar barramentos (busbars) e soltar

conectores. Conexões frouxas aumentam a resistência interna, gerando calor excessivo e risco de arcos elétricos.

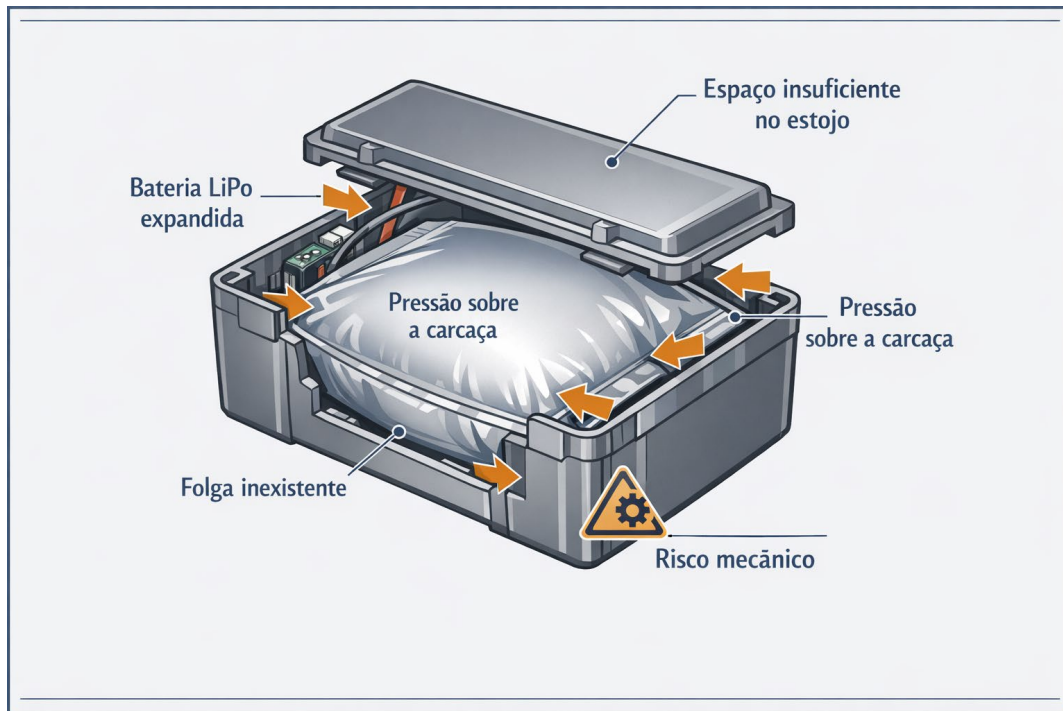
- Danos às Células Internas: O movimento pode causar microfissuras na interface dos eletrodos ou deslocar o material ativo (como o grafite) dos coletores de corrente, o que reduz permanentemente a capacidade de armazenamento da bateria.
- Risco de Curto-Circuito: A vibração pode deformar os separadores (camadas finas que isolam o anodo do catodo). Se o separador falhar devido ao atrito ou pressão mecânica, ocorre um curto-circuito interno que pode levar à fuga térmica (incêndio ou explosão).
- Conformidade com Normas: Aplicações específicas exigem testes rigorosos de vibração (como a varredura senoidal da norma UN38.3 para transporte ou a SAE J2380 para veículos elétricos) para garantir que o pack suporte o ambiente operacional sem falhar.

Para ambientes de alta vibração, o projeto deve incluir suportes estruturais mais robustos, materiais de amortecimento e técnicas de fixação de células mais seguras.

### **1.2.7 Especificação do tamanho máximo**

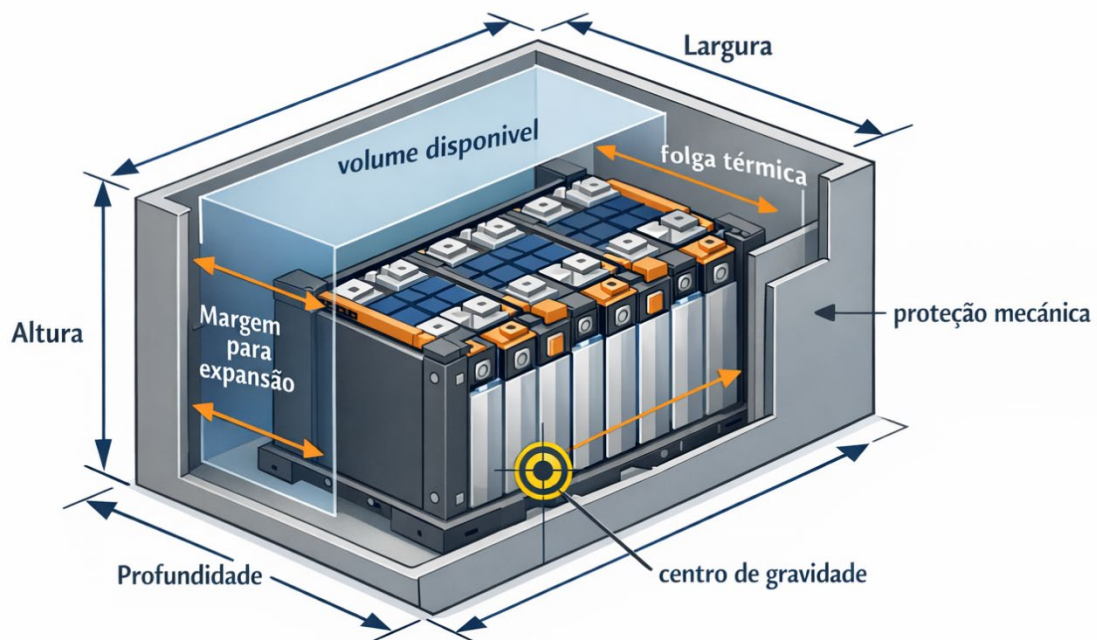
Especificar o tamanho máximo permitido para um pack de baterias é fundamental por razões que vão além do simples "encaixe". No design de engenharia, o volume disponível dita quase todas as outras capacidades do sistema:

- Densidade Energética: O espaço físico limita a quantidade de células que você pode colocar. Saber o tamanho máximo define o limite de autonomia (Wh) e potência (W) que o pack poderá entregar.
- Gerenciamento Térmico: Baterias precisam "respirar". Se o pack ocupar todo o espaço disponível sem folga, não haverá fluxo de ar ou espaço para sistemas de resfriamento líquido. Isso causa superaquecimento e reduz a vida útil.
- Distribuição de Peso e Centro de Gravidade: Em veículos ou drones, o volume do pack altera a dinâmica do objeto. O tamanho máximo garante que o peso da bateria esteja concentrado onde o projeto estrutural foi planejado para suportá-lo.
- Segurança e Expansão: Baterias de íon-lítio, por exemplo, sofrem uma leve expansão física (inchamento) durante os ciclos de carga e descarga ou conforme envelhecem. Se não houver uma margem no tamanho máximo, essa expansão pode esmagar as células ou romper a carcaça do dispositivo.



**Figura 8 – Espaço Insuficiente para alojar a bateria**

- **Proteção Mecânica:** O pack precisa de uma "armadura". O tamanho máximo leva em conta não só as células, mas a espessura das paredes de proteção contra impactos e furos.



**Figura 9 – Proteção mecânica**

### 1.2.8 Aplicação

Especificar a aplicação é o que define o "DNA" do projeto do pack, pois cada uso exige um equilíbrio diferente entre **potência, energia e durabilidade**.

Os principais motivos são:

**Perfil de Descarga (Taxa C):** Uma furadeira exige picos de corrente altíssimos em poucos segundos, enquanto um sistema solar libera energia de forma lenta e constante. A química e as conexões internas mudam completamente conforme essa demanda.

- **Ciclo de Vida:** Em um satélite ou sistema de backup industrial, a prioridade é que a bateria dure 10 ou 15 anos. Em um brinquedo ou eletrônico de consumo, o custo baixo é mais importante que uma vida útil extrema.
- **Certificações e Normas:** Cada setor tem exigências legais diferentes. Uma bateria para **dispositivos médicos** precisa de redundâncias de segurança que uma bateria para um controle remoto não precisa. Isso vale para aviação ou setor automotivo.
- **Ambiente Operacional:** Se a aplicação é "uso marítimo", o pack precisa de proteção contra corrosão e umidade. Se for para "mineração", precisa de carcaças reforçadas contra impactos severos.
- **Lógica do BMS (Battery Management System):** O software que gerencia a bateria é programado de acordo com o uso. Em um veículo elétrico, o BMS prioriza a autonomia e a regeneração; em um sistema de emergência (UPS), ele foca em estar sempre 100% carregado e pronto para agir.

### 1.2.9 Tipo de Célula

Especificar o tipo de célula é o passo mais crítico porque cada modelo (como uma **18650, 21700** ou **prismática**) possui uma "personalidade" química e física distinta que dita o que o pack pode ou não fazer.

E dependendo da aplicação poderá haver alguma restrição quanto ao tipo de célula

Os motivos principais são:

- **Química e Tensão:** Células de **LFP** (Lítio-Ferro-Fosfato) operam em voltagens diferentes de células **NMC** (Níquel-Manganês-Cobalto). O tipo de célula define a tensão final do pack e como o carregador deve se comportar.

## QUÍMICAS DE CÉLULAS DE LÍTIO EM PACKS DE BATERIAS



Figura 10 – Principais químicas - células de lítio: NMC, NCA, LFP e LTO.

- **Capacidade de Corrente:** Algumas células são projetadas para energia (longa duração, baixa corrente), enquanto outras são para potência (descargas rápidas e intensas). Usar o tipo errado pode fazer a célula superaquecer ou até incendiar sob carga pesada.
- **Fator de Forma e Montagem:** O formato (cilíndrica, prismática ou *pouch*) determina como as células serão conectadas e presas. Isso afeta diretamente o design do suporte (spacer) e o método de soldagem.
- **Estabilidade Térmica:** Algumas químicas são inerentemente mais seguras contra fogo do que outras. O tipo de célula define quão robusto precisa ser o sistema de extinção de incêndio ou resfriamento do pack.
- **Custo e Disponibilidade:** O projeto precisa ser viável. Especificar o tipo garante que a cadeia de suprimentos consiga entregar células com características idênticas para que o pack seja equilibrado.

## Principais Tipos de Células de Lítio

### Cilíndrica



18650 / 21700

Robustez mecânica



### Prismática



Melhor aproveitamento de espaço



### Pouch (polímero)



Leve e fina



Figura 11 – Principais formatos: cilíndrica, prismática e pouch

### 1.2.10 Exemplo de especificação técnica de packs de baterias

Este documento reúne todos os dados de engenharia, segurança e desempenho necessários para a integração do produto ao projeto.

#### O que este documento deve conter:

- **Dados Elétricos:** Capacidade nominal, tensão de operação e limites de corrente.
- **Desempenho Térmico:** Limite de temperatura segura.
- **Especificações Mecânicas:** Dimensões exatas, tipo de encapsulamento e conectores.

A seguir apresentamos um exemplo de folha de especificação técnica de packs de baterias, usada pela empresa S.T.A. – Sistemas e Tecnologia Aplicada.



Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA

## FOLHA DE ESPECIFICAÇÃO DE PACK DE BATERIAS

Tensão Máxima (V)	
Tensão Mínima (V)	
Capacidade (mAh)	
Corrente Média Descarga (A)	
Corrente de Pico Descarga (A)	
Duração do Pico de Corrente Descarga (s)	
Número de Picos de Corrente Descarga por Hora	
Corrente Média de Carga (A)	
Corrente de Pico de Carga (A)	
Temperatura Ambiente de Operação (°C)	
Pack sujeito à vibrações? (sim/não)	
Pack sujeito a choques mecânicos? (sim/não)	
Comprimento do Fio de Saída (cm)	
Bitola do Fio de Saída (mm <sup>2</sup> )	
Necessita porta separada para carga/descarga (sim/não)	
Altura Máxima (mm)	
Largura Máxima (mm)	
Profundidade Máxima (mm)	
Aplicação (onde o pack será usado)	
Tipo de Célula ( NiCd, NiMh, Li Ion, LiFePO <sub>4</sub> , Lipo)	
Necessita placa PCM? (sim/não)	
Necessita placa PCM com balanceamento? (sim/não)	
Necessita placa PCM com controle de temperatura (sim/não)	
Modelo do conector do pack	
Peso Máximo (kg)	

De Acordo:

\_\_\_\_\_  
Cliente:

\_\_\_\_\_  
Depto Eng. STA:

**IMPORTANTE:** A STA não aceitará devolução de packs de baterias cujas especificações não foram totalmente fornecidas pelo cliente.

Figura 12 – Folha de especificação técnica de pack de baterias

## Capítulo 2: Fundamentos das Células

Para entender um pack, você precisa dominar o que acontece dentro da unidade básica: a célula. Pense nela como uma "bomba química" de íons.

Aqui estão os fundamentos essenciais que compõem qualquer célula de lítio:

### 1. A Anatomia Interna (Os 4 Componentes)

Toda célula, seja ela cilíndrica ou prismática, possui quatro partes vitais:

- Anodo (Polo Negativo): Geralmente feito de grafite. É onde os íons de lítio "moram" quando a bateria está carregada.
- Catodo (Polo Positivo): Define a "química" da bateria (LFP, NMC, NCA). É para onde os íons querem ir para liberar energia.
- Eletrólito: Um líquido ou gel condutor que permite que os íons de lítio nadem do anodo para o catodo.
- Separador: Uma membrana polimérica ultra-fina que impede o contato físico entre anodo e catodo (o que causaria um curto-circuito), mas permite a passagem dos íons.

### 2. O Funcionamento (O "Balanço" dos Íons)

- Descarga: Os íons de lítio saem do anodo e viajam pelo eletrólito até o catodo. Ao mesmo tempo, os elétrons são forçados a percorrer o circuito externo (seu motor ou lâmpada), gerando eletricidade.
- Carga: O carregador aplica pressão elétrica, empurrando os íons de volta para o anodo, onde eles ficam "armazenados" sob tensão.

### 3. As Três Métricas Fundamentais

Para trabalhar com células, você deve entender estes números:

- Tensão Nominal (V): A "pressão" média. Para lítio comum, é 3.6V/3.7V. Para LFP, é 3.2V.
- Capacidade (Ah/mAh): O "tamanho do tanque". Quanto de carga ela consegue segurar.
- Taxa C (C-Rate): A velocidade de descarga. Uma célula de 3000mAh com taxa de 2C pode entregar 6A de corrente contínua.

### 4. Janela de Operação (Limites de Segurança)

Diferente de uma pilha comum, a célula de lítio é sensível:

- Corte Superior (4.2V): Carregar acima disso decompõe o eletrólito e gera risco de fogo.
- Corte Inferior (2.5V a 3.0V): Descarregar abaixo disso causa danos químicos permanentes e a célula pode nunca mais carregar.

## 5. Formatos Físicos

- Cilíndricas: Robustas e fáceis de resfriar (ex: 18650, 21700).
- Prismáticas: Caixas metálicas que aproveitam melhor o espaço em grandes bancos de baterias.
- Pouch (Bolsa): Leves e finas, usadas em celulares e drones, mas perigosas se incharem.

### 2.1 Tipos de Química: Li-íon (NMC/NCA), LiFePO4 e LTO

A escolha da química da célula é a decisão de engenharia mais crítica de um projeto, pois define o equilíbrio entre densidade energética, segurança, custo e vida útil do pack. No ambiente industrial, as três principais variantes de íons de lítio dominam o mercado:

#### A. Lítio Níquel Manganês Cobalto (NMC) e NCA

Comumente chamadas de "Li-íon" padrão em eletrônicos e veículos de passageiros.



Figura 13 - Célula Li-íon

- **Características:** Alta densidade energética (150–250 Wh/kg).
- **Vantagens:** Permite packs compactos e leves com alta autonomia.
- **Desvantagens:** Estabilidade térmica inferior; risco de fuga térmica (*thermal runaway*) a temperaturas mais baixas (~210°C).
- **Aplicação Ideal:** Mobilidade elétrica leve, drones industriais e ferramentas de alta potência.

## B. Fosfato de Ferro de Lítio (LiFePO<sub>4</sub> ou LFP)

A química de escolha para sistemas estacionários e transporte pesado.

- **Características:** Densidade energética moderada (90–160 Wh/kg), mas excepcional estabilidade química.



Figura 14 - Célula LiFePO<sub>4</sub>

- **Vantagens:** Alta segurança (não libera oxigênio em caso de falha), vida útil longa (2.000 a 5.000+ ciclos) e baixo custo (livre de cobalto).
- **Desvantagens:** Maior peso e volume para a mesma capacidade; curva de descarga muito plana, o que dificulta a estimativa de SoC (estado de carga) apenas por tensão.
- **Aplicação Ideal:** Sistemas de Armazenamento de Energia (BESS), empilhadeiras e barcos elétricos.

## C. Titanato de Lítio (LTO)

A solução de nicho para condições extremas.



Figura 15 - Célula LTO

- **Características:** Baixa densidade energética (70–110 Wh/kg), mas potência de descarga e carga massivas.
- **Vantagens:** Suporta recargas ultrarrápidas (10C+), opera em temperaturas negativas extremas (-30°C) e possui a maior vida útil do mercado (até 20.000 ciclos).
- **Desvantagens:** Custo por kWh extremamente elevado e baixa densidade. Pouco disponível no mercado brasileiro
- **Aplicação Ideal:** Ônibus urbanos com carga rápida em paradas, infraestrutura crítica de rede e ambientes árticos/siberianos.

**Tabela Comparativa para Decisão Técnica**

Parâmetro	NMC (Li-íon)	LiFePO4 (LFP)	LTO
Tensão nominal	3,6 V a 3,7 V	3,2 V	2,3 V a 2,4 V
Ciclo de vida	500 a 1.500 ciclos	2.000 a 7.000 ciclos	10.000 a 30.000 ciclos
Segurança térmica	Moderada	Alta	Altíssima
Custo por kWh	Médio	Baixo	Muito alto
Disponibilidade de fornecedores no Brasil	Muitos	Alguns	Muito poucos

## 2.2 Formatos Comuns: Cilíndricas, Prismáticas e Pouch

A geometria da célula determina não apenas a densidade volumétrica do pack, mas também a complexidade da linha de montagem, a eficiência do sistema de arrefecimento e a resistência estrutural do conjunto final.

### A. Células Cilíndricas (Ex: 18650, 21700)

São o padrão da indústria para alta consistência produtiva.

- **Vantagens:** Alta resistência mecânica contra expansão interna; excelente dissipação de calor devido aos espaços vazios entre as células; facilidade de automação em larga escala.
- **Desvantagens:** Baixa densidade de empacotamento (perda de espaço entre cilindros); exige centenas de conexões (soldas) para packs de alta capacidade.
- **Uso Industrial:** Veículos leves, ferramentas elétricas e baterias de backup para telecomunicações.

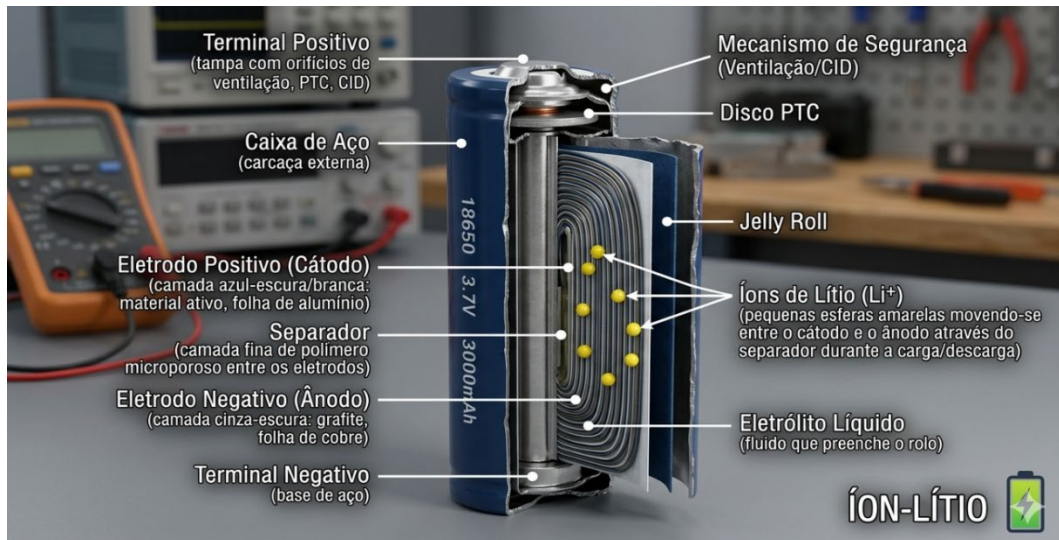


Figura 16 - Componentes da célula Li-ion

## B. Células Prismáticas

Células envoltas em caixas rígidas de alumínio ou aço.

- **Vantagens:** Melhor aproveitamento de espaço (maior densidade volumétrica); terminais robustos (geralmente com roscas M6/M8), facilitando a conexão de barramentos (*busbars*) por parafusos ou solda laser.
- **Desvantagens:** Necessitam de compressão mecânica externa para evitar o estufamento (swelling) durante os ciclos de carga/descarga; gestão térmica mais complexa no centro da célula.
- **Uso Industrial:** Sistemas Estacionários de Grande Porte (BESS), caminhões e ônibus elétricos.



Figura 17 – Montagem de células prismáticas



Figura 18 – Célula Prismática

### C. Células Pouch (Laminadas)

Células contidas em uma bolsa flexível de polímero de alumínio.

- **Vantagens:** Menor peso por kWh (sem carcaça metálica); flexibilidade de dimensões sob encomenda; excelente dissipação térmica superficial.
- **Desvantagens:** Extremamente vulneráveis a perfurações; exigem estruturas de suporte complexas para evitar expansão e garantir a integridade mecânica.
- **Uso Industrial:** Drones de alta performance, protótipos de corrida e eletrônicos de consumo ultrafinos.

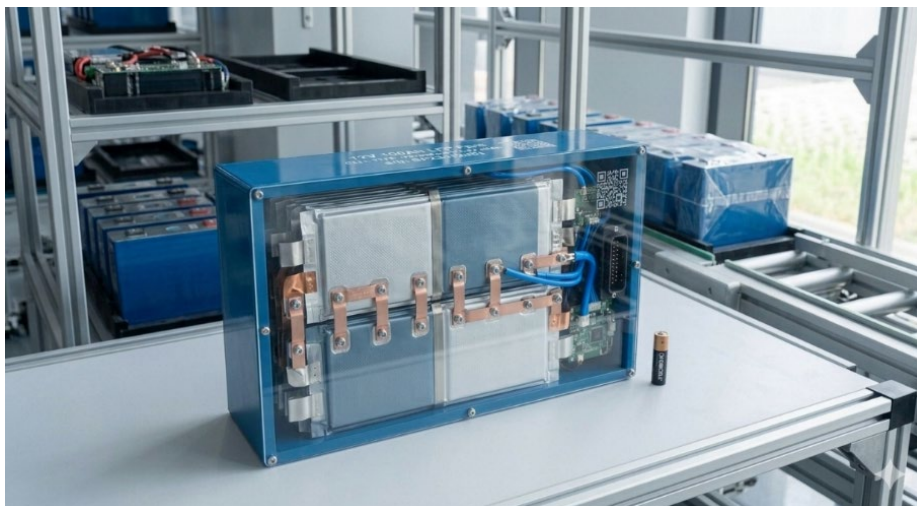


Figura 19 – Montagem com células tipo pouch



Figura 20 – Célula tipo pouch

### Resumo Comparativo para o Projetista

Característica	Cilíndrica	Prismática	Pouch
Escalabilidade	Altíssima	Alta	Média
Robustez mecânica	Excelente	Boa	Baixa
Facilidade de montagem	Média (requer solda por ponto)	Alta (barramentos e parafusos)	Baixa (requer estruturas de suporte)
Custo por Ah	Baixo	Médio	Médio a alto

#### Ponto de Atenção: Expansão Térmica e Mecânica

Em ambientes industriais, células **Prismáticas** e **Pouch** exigem o cálculo de **força de compressão**. Sem o confinamento adequado, a expansão interna das camadas de eletrodo reduz drasticamente o ciclo de vida da bateria e pode comprometer os barramentos de conexão.

## 2.3 Entendendo o Datasheet: Capacidade, Tensão e Taxa de Descarga (C-rate)

Ao selecionar uma célula para uma linha de produção, quatro parâmetros fundamentais regem o dimensionamento do pack:

### A. Capacidade Nominal vs. Capacidade Útil (Ah/mAh)

A capacidade indica a quantidade de carga elétrica que a célula pode armazenar.

- **Capacidade Nominal:** Valor de laboratório (ex: 3500mAh) testado em condições ideais (geralmente descarga de 0.2C a 25°C).
- **Capacidade Útil (Industrial):** Na prática, para estender o ciclo de vida (SoH), utiliza-se uma "janela operacional" (ex: de 10% a 90% de carga). Projetar considerando 100% da capacidade nominal reduz drasticamente o ROI do ativo.

### B. Tensão (Voltage): Nominal, Charge e Cut-off

- **Nominal:** O patamar médio de operação (ex: 3.6V para NMC, 3.2V para LFP).
- **Charge (Upper Limit):** Tensão máxima de carga (ex: 4.2V para NMC). Ultrapassar este valor causa decomposição do eletrólito e risco de incêndio.
- **Cut-off (Discharge Limit):** Tensão mínima de segurança (ex: 2.5V para NMC). Descarregar abaixo disso causa danos químicos irreversíveis (formação de dendritos de cobre).

### C. Taxa de Carga e Descarga (C-rate)

O **C-rate** define a velocidade com que a energia é inserida ou extraída da célula em relação à sua capacidade.

- **Cálculo:** Se uma célula de 3Ah tem descarga de **2C**, ela pode fornecer **6A** (3 x 2). Se a carga é de **0.5C**, ela deve ser carregada a **1.5A**.
- **Impacto Industrial:** Altas taxas C geram calor exponencial (Lei de Joule). Em packs industriais, a operação contínua acima de 1C exige sistemas de arrefecimento ativo para evitar a degradação acelerada.

## D. Resistência Interna (IR / AC Impedance)

Frequentemente negligenciada, a IR determina a eficiência e o aquecimento da célula.

- **Consistência:** Em uma linha de montagem automatizada, as células de um mesmo pack devem ter IRs idênticas (tolerância < 5mΩ). Células com IR discrepante desequilibram o pack e sobrecarregam o BMS.

### Exemplo Prático de Interpretação (Célula Industrial 21700)

Parâmetro do datasheet	Valor típico	Implicação no projeto
Max. Continuous Discharge	35 A	Define a corrente máxima que a bateria pode entregar.
Standard Charge Current	1,7 A (0,5C)	Define o tempo de recarga padrão (neste caso, aproximadamente 2 horas).
Cycle Life	1.000 ciclos (80% DoD)	Define a vida útil estimada da bateria quando usada a 80% da capacidade.
Operating Temp. (Discharge)	-20 °C a 60 °C	Define a faixa de temperatura de operação na descarga.

### Ponto de Verificação Técnica

Um erro comum em projetos industriais é confundir **Corrente de Pico** (Burst) com **Corrente Contínua**. A corrente de pico é o valor máximo de corrente que o pack de baterias deve fornecer. Já a corrente em regime contínuo é a corrente em regime permanente (Constante) que o pack de baterias pode fornecer sem sobreaquecer demasiadamente.

Por exemplo um equipamento de transmissão de dados (IOT) transmite 3 vezes por dia, sendo que cada transmissão consome 100 mA durante 30 minutos e pico de 500 mA durante 1 minuto.

Para calcular a **corrente média** em 24 horas, seguimos estes passos:

Primeiro, calculamos quanto de "combustível" (carga) cada um dos 3 ciclos consome:

Fase de 100 mA =  $100 \text{ mA} \times 30 \text{ min} / 60 \text{ min} = 50 \text{ mAh}$

Fase de 500 mA =  $500 \text{ mA} \times 1 \text{ min} / 60 \text{ min} = 8,33 \text{ mAh}$

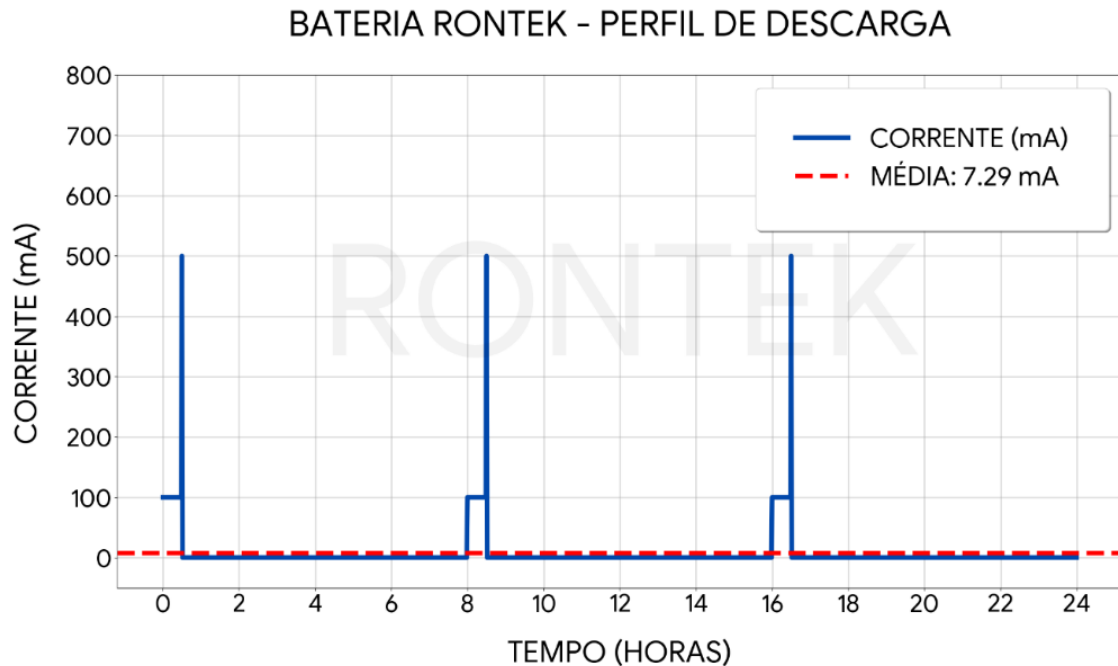
Consumo por ciclo = 58,33 mA

Depois calculamos o consumo diário:

Consumo em 24 horas (3 ciclos) =  $58,33 \times 3 = 175 \text{ mAh}$

E finalmente a corrente média por dia:

Corrente Média =  $175 \text{ mAh} / 24 \text{ h} = 7,29 \text{ mA}$



**Figura 21 – Perfil de descarga**

Se esse equipamento for alimentado por uma bateria de 2.600 mAh, essa bateria terá de autonomia de:

Tempo de Autonomia =  $2.600 \text{ mAh} / 7,29 \text{ mA} = 356 \text{ horas}$  ou aproximadamente 14 dias

## **2.4 Como selecionar as células (match)**

Para fazer o match (casamento) correto de células de lítio e garantir que o pack seja seguro e durável, você precisa seguir três critérios de compatibilidade obrigatórios. Se as células não forem "parceiras", as mais fracas serão sobrecarregadas, aquecerão e o pack morrerá prematuramente.

Aqui está o passo a passo para a compatibilização:

### **1. Capacidade Real (Ah ou mAh)**

As células ligadas em série devem ter a mesma capacidade. Se uma célula tiver 2500mAh e outra tiver 3000mAh, a de menor capacidade vai descarregar primeiro, atingindo a voltagem mínima antes das outras. Isso força o BMS a desligar o pack inteiro, mesmo com energia sobrando nas outras células.

- Ação: Use um carregador/analizador para medir a capacidade real de descarga, não confie apenas no que está escrito no rótulo.

### **2. Resistência Interna ( $m\Omega$ )**

Este é o ponto que a maioria ignora. Células com resistência interna alta esquentam mais e perdem tensão (voltage drop) mais rápido sob carga. Se você misturar células com resistências muito diferentes, elas não vão dividir a corrente de forma igual nos grupos em paralelo.

- Ação: Meça a resistência interna (IR) com um multímetro específico (medidor de miliohms AC). Descarte ou agrupe células com valores próximos.

### **3. Tensão de Repouso (V)**

Antes de montar o pack, todas as células devem estar na mesma voltagem (com uma tolerância de no máximo 0,05V). Se você conectar em paralelo uma célula carregada (4.2V) com uma descarregada (3.0V), a corrente fluirá tão rápido de uma para a outra que pode derreter as conexões ou causar fogo.

- Ação: Carregue todas as células individualmente até 100% ou deixe-as em "repouso" conectadas por um resistor de equilíbrio antes da soldagem final.

### **Dica de Ouro: Mesma Marca e Lote**

A forma mais fácil de garantir o match é usar células novas, da mesma marca, modelo e, preferencialmente, do mesmo lote de fabricação. Lotes diferentes podem ter variações químicas que alteram o comportamento da bateria ao longo dos meses.

## Capítulo 3: Arquitetura do Pack

A arquitetura de um pack de baterias é a organização hierárquica e estrutural de todos os componentes que transformam células individuais em um sistema de energia funcional e seguro. Ela pode ser dividida em quatro camadas principais:

### 1. Camada Eletroquímica (As Células)

É a base de tudo. As células são conectadas em duas direções:

- Série (S): Soma-se a voltagem (ex: 10 células de 3.6V em série = 36V).
- Paralelo (P): Soma-se a capacidade/autonomia (ex: 3 células de 3000mAh em paralelo = 9000mAh).
- *Exemplo:* Uma arquitetura 10S3P usa 30 células para entregar 36V com tripla autonomia.

### 2. Camada Elétrica e de Interconexão

Responsável por levar a energia das células para o mundo externo:

- Barramentos (Busbars) ou Fitas de Níquel: Condutores que unem os polos das células. Devem ser dimensionados para não derreterem com a corrente do projeto.
- BMS (Battery Management System): O "cérebro". É uma placa eletrônica que monitora a voltagem de cada grupo de células, controla a temperatura e corta a energia em caso de curto-circuito ou sobrecarga.
- Fiação de Sinal: Cabos finos que conectam cada série ao BMS para o balanceamento.

### 3. Camada Térmica

Gerencia o calor para evitar a degradação:

- Passiva: Espaçadores entre as células para permitir a circulação de ar e materiais de interface térmica (TIM) para dissipar calor para a carcaça.
- Ativa (em sistemas grandes): Ventoinhas para ar forçado ou placas de resfriamento líquido (comuns em carros elétricos como Tesla).

#### 4. Camada Mecânica e Estrutural (O Invólucro)

Protege o sistema contra o ambiente:

- Suportes (Spacers): Estruturas plásticas que mantêm as células fixas e isoladas eletricamente umas das outras, evitando que a vibração cause curtos.
- Carcaça (Enclosure): Caixa externa que deve ser resistente a impactos e, dependendo da aplicação, vedada contra água e poeira (IP65/IP67).
- Alívio de Tensão: Componentes que garantem que os cabos de saída não sejam arrancados do BMS por puxões acidentais.

### 3.1 Elementos principais de um pack de baterias

No design industrial, a arquitetura do pack define a voltagem do barramento CC e a densidade de corrente que os condutores deverão suportar.

Muitas vezes, uma única bateria não é capaz de fornecer a tensão ou a corrente necessária. Nesses casos é necessário montar várias baterias em conjunto. Esses conjuntos de baterias são popularmente conhecidos como “packs de baterias”.

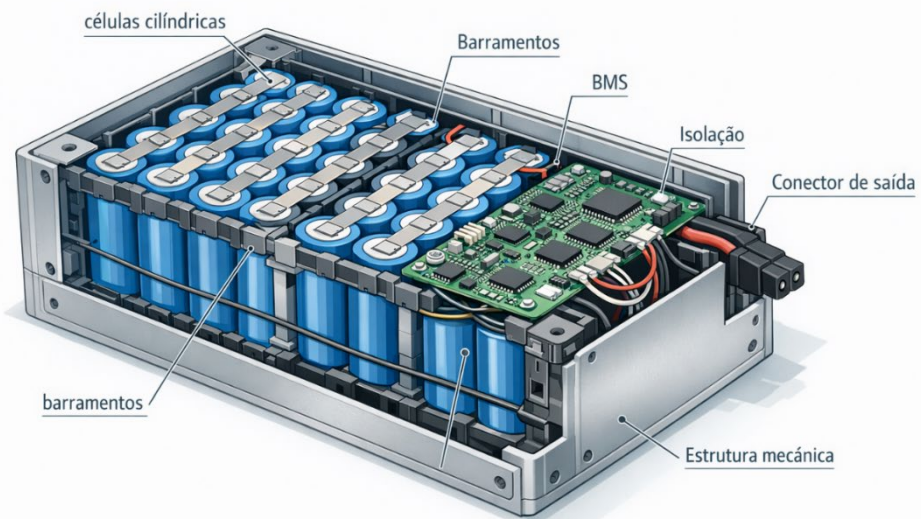


Figura 22 - Pack de baterias com 6 células de lítio-íon

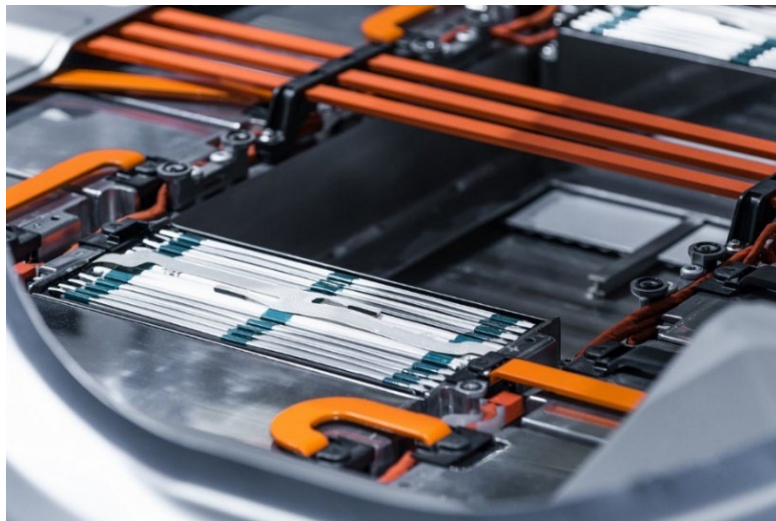
Packs de baterias são feitos pela combinação de baterias individuais. Através da combinação de várias células, se obtêm capacidades e tensões diferentes. A forma como estas células são combinadas determina as especificações finais para cada bateria resultante (pack de bateria).



**Figura 23 - Pack de baterias com 40 células de lítio-íon para e-bike**



**Figura 24 - Elementos principais do pack de baterias de lítio**



**Figura 25 - Pack de baterias com células lítio polímero para veículos elétricos**

### 3.2 Associação em Série (S)

Conecta-se o polo positivo de uma célula (ou bloco paralelo) ao polo negativo da próxima.

- **Objetivo:** Elevar a tensão nominal para reduzir a corrente necessária para a mesma potência ().
- **Implicação Técnica:** A corrente que atravessa a série é a mesma para todas as células. Se uma célula tiver resistência interna (IR) mais alta, ela aquecerá mais que as outras, criando um gradiente térmico perigoso.
- **Ponto Crítico:** A capacidade total do pack em série é limitada pela **célula de menor capacidade**. Se uma célula "morre" ou atinge o *cut-off* antes das outras, o pack inteiro é interrompido pelo BMS para proteção.

Quando a tensão de uma célula não é suficientemente alta para alimentar determinada carga, ligam-se duas ou mais células em série, para obter tensões mais elevadas.



Figura 26 - Pack de baterias para modelismo – 3 células em série – 11,1 V

Em uma conexão em série, o terminal positivo de uma bateria é conectado ao polo negativo de outra bateria e assim sucessivamente. O terminal positivo de uma célula sempre se conecta ao polo negativo da célula seguinte.

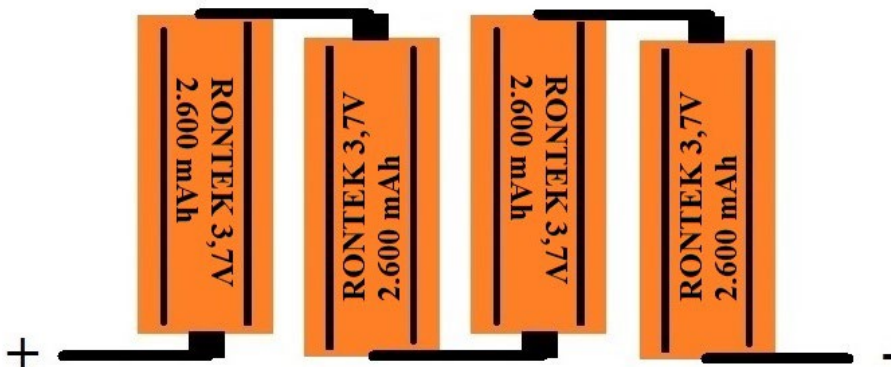


Figura 27 - Ligação em série

Essas conexões em série podem combinar apenas duas células ou centenas de células. O número de células ligadas em série depende da tensão que é necessária. Para calcular a tensão de um conjunto de células de baterias ligadas em série, basta multiplicar a tensão de uma célula pelo número de células em conexão em série.

$$\text{Tensão do pack com baterias em série} = \text{Tensão de uma célula} \times \text{número de células em série.}$$

Numa ligação em série, a capacidade resultante é igual à capacidade individual de cada célula.

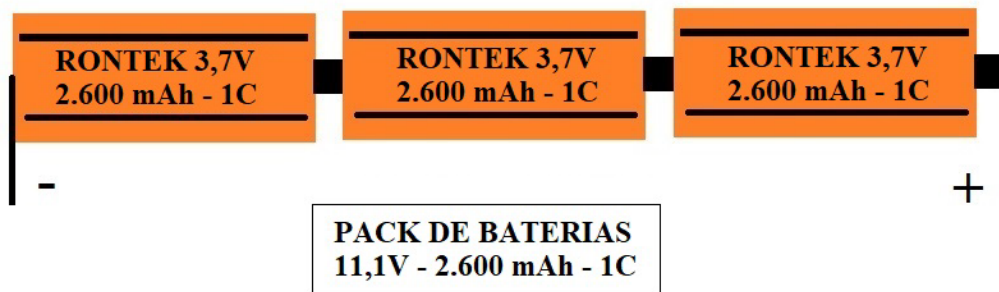


Figura 28 - Pack de baterias ligadas em série

$$\text{Capacidade do pack com baterias em série} = \text{Capacidade de uma célula}$$

Numa ligação em série, a corrente que pode ser fornecida pelo pack de baterias é igual à corrente individual que cada célula é capaz de fornecer. Se cada célula é capaz de fornecer uma corrente de 1C, a corrente que o pack de baterias poderá fornecer também será de 1C.

$$\text{Corrente do pack com baterias em série} = \text{Corrente de uma célula}$$

Usando células de lítio-íon de 3,7V, se ligamos duas células em série, teremos 7,4V. Se adicionarmos uma célula a mais em série, para um total de três células teremos uma bateria de 11,1V. Com dez células em série teremos 37 V. Com quinze células em série teremos 55,5 V.

Uma coisa importante a lembrar é que a tensão nominal de uma bateria ou célula é só um valor de tensão na curva de descarga da bateria. Na realidade, durante o processo de descarga, a bateria apresenta vários valores de tensão.

Uma célula de lítio-íon de 3,7V nominais, pode ser carregada até 4,2V e descarregada até 2,5V.

Então se montarmos um pack de baterias com 10 células em série teremos uma tensão de 42V quando totalmente carregado e de 25V quando totalmente descarregado.

Se temos um dispositivo que requer pelo menos 30V para operar, então parariamos de descarregar esse pack em 3,0V por célula, mesmo que a bateria ainda tivesse energia suficiente para ser descarregada até 25V.

Isso equivale a não utilizar cerca de 5% da capacidade total do pack. Podemos achar que 5% não é uma grande coisa, mas e se esse dispositivo necessitasse 35V?

Teríamos que parar a descarga quando cada célula chegasse a 3,5V, o que equivaleria a deixar cerca de 40% da capacidade da bateria não utilizada.

É por isso que é importante considerar toda a gama de tensão de uma bateria ao calcular quantas células em série são necessárias para um projeto.

Muitos equipamentos eletrônicos como inversores, motores elétricos e outros dispositivos de corrente contínua são projetados para tensões em incrementos de 12V, como um farol de 12V ou uma bicicleta elétrica de 48V. Este é um resquício de muitos anos, quando as baterias de chumbo-ácido foram usadas para estes tipos de dispositivos de potência.

Baterias de chumbo-ácido usam células que têm uma tensão nominal de 2V. Normalmente se ligam 6 células em série no interior da bateria de forma a se obter 12V.

Essas baterias de 12V são facilmente conectadas em série para criar qualquer outra bateria com incrementos de 12V. O problema que este velho sistema criou para nós é que a maioria das baterias de lítio-íon não consegue dar uma tensão de 12V.

A maioria dos eletrônicos, mas não todos, são capazes de lidar com uma pequena gama de tensões acima e abaixo de sua tensão nominal. Por exemplo, um farol de

12V provavelmente funciona relativamente bem com uma tensão de entre 9V e 15V, embora equipamentos mais sensíveis tenham intervalos menores de tensão admissível. Esta gama de tensão nos permite usar uma bateria de lítio-íon cuja tensão de 11,1V é próxima aos 12V.

Por exemplo, bicicletas elétricas são geralmente projetadas para baterias de 24V, 36V ou 48V. Novamente, isso ocorre porque a maioria dos componentes para bicicletas elétricas foram originalmente projetados para baterias de chumbo-ácido.

A bateria de lítio-íon mais comumente aceita para bicicletas elétricas de 24V, são 7 células em série, que criam uma tensão de 25,9V nominal e que na prática varia de aproximadamente de 21V a 29V durante o uso.

Para bicicletas elétricas de 36V, quase todos os fabricantes usam 10 células de lítio-íon em série para criar 37V nominais que varia de aproximadamente 30V a 42V durante o uso.

Quando se trata de bicicletas elétricas de 48V baterias de lítio-íon com 13 células em série costuma ser a configuração mais popular para uma bateria de 48V. Isto resulta em uma tensão nominal de 48,1V e uma tensão sob uso de aproximadamente entre 39V e 54V.

No entanto, com a queda de tensão, a bateria realmente passaria a maioria de seu tempo abaixo de 48V, o que resulta em menos energia.

Por esta razão, muitas baterias de 48V para bicicletas elétricas são feitas agora com 14 células em série o que dá uma tensão nominal de 51,8V e tem uma maior gama de tensão variando de aproximadamente 42V a 58,8V.

Estas baterias são muitas vezes especificadas como baterias de 52V em vez de 48V para significar que elas têm de fato uma tensão maior do que as baterias de lítio-íon de 48V.

Outras indústrias nem sempre tem esse problema de incremento de 12V e essencialmente podem usar qualquer tensão que projetem para seus dispositivos. Ferramentas que usam baterias são um grande exemplo.

Células de LiFePO<sub>4</sub> se prestam mais facilmente a incrementos de 12V. Com 3,2V nominais por célula, combinando quatro células de LiFePO<sub>4</sub> em série, se criará um pack de baterias de tensão de 12,8V nominais, que está muito perto de 12V.

As células de LiFePO<sub>4</sub> são bastante populares para veículos elétricos originalmente projetados para baterias de chumbo-ácido de 12V.

Um conjunto de 5 baterias à base de níquel ligadas em série, fornece 6V (6,25V com uma tensão nominal de 1,25V por célula) e um conjunto de 6 baterias fornece 7,2V.

A bateria de chumbo-ácido portátil vem em formato de 3 células (6V) e em 6 células (12V).

A família de baterias lítio-íon tem 3,6V para um conjunto de 1 célula, 7,2V para um conjunto de 2 células e 10,8V para um conjunto de 3 células. As baterias de 3,6V e 7,2V são comumente usadas em telefones celulares; laptops usam conjuntos de 10,8V.

### 3.3 Associação em Paralelo (P)

Conecta-se todos os polos positivos entre si e todos os negativos entre si.

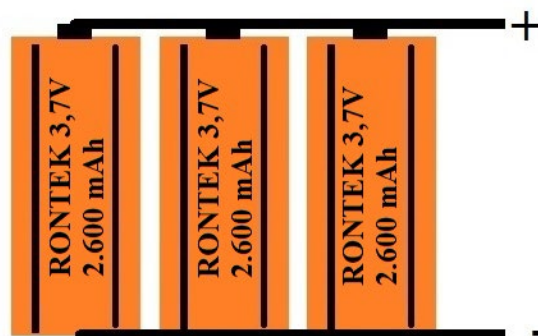
- **Objetivo:** Aumentar a autonomia (Ah) e distribuir a carga de corrente entre as células.
- **Vantagem de Projeto:** Ao colocar 10 células em paralelo, cada uma fornece apenas 1/10 da corrente total. Isso reduz o estresse químico e o calor gerado individualmente (Perda Joule).
- **Auto-balanceamento:** Células em paralelo mantêm a tensão naturalmente. Se uma célula tem tensão menor, as outras "cedem" carga para ela até o equilíbrio (cuidado: correntes de circulação altas em células desbalanceadas na montagem podem fundir conexões).

Conexões em paralelo são usadas para a obtenção de alta capacidade (Ah) ou alta corrente (A).

Frequentemente, uma conexão paralela é a única opção de aumentar a capacidade da bateria.

Entre as químicas de baterias, a de lítio-íon é a que melhor permite conexão paralela.

Conexões paralelas são feitas conectando os terminais positivos entre si e também os terminais negativos.



**Figura 29 - Ligação em paralelo**

Para conectar duas células em paralelos, simplesmente conecta-se o terminal positivo da primeira célula com o terminal positivo da segunda célula e em seguida, conecta-se o terminal negativo da primeira célula para o terminal negativo da segunda célula.

Isto essencialmente cria uma célula maior, porque as duas células agora partilham os mesmos terminais e funcionam como células de uma bateria. Na ligação em paralelo a capacidade do conjunto é igual à soma das capacidades de cada bateria.

<p><b>Capacidade do pack com baterias em paralelo =</b>  <b>Capacidade de uma célula x número de células em paralelo.</b></p>
---

A corrente do pack com baterias ligadas em paralelo é igual à soma das correntes que cada célula em paralelo é capaz de fornecer.

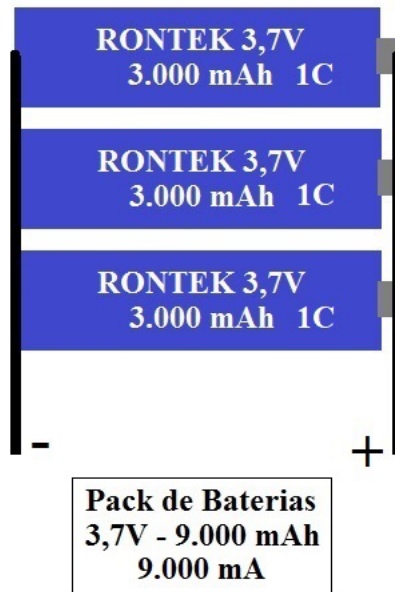
<p><b>Corrente do pack com baterias em paralelo =</b>  <b>Corrente de uma célula x número de células em paralelo.</b></p>
---

A tensão do pack com bateria em paralelo é igual à tensão de uma célula.

<p><b>Tensão do pack com baterias em paralelo =</b>  <b>Tensão de uma célula</b></p>
--

Conectando-se em paralelo duas células de 3,7V e capacidade de 3.000 mAh e corrente de 1C ou 3.000 mA, juntando-se os terminais positivos e, em seguida, seus terminais negativos, teremos criado uma bateria de 3,7V, 6.000 mAh e corrente de 6.000 mA.

Adicionando uma célula a mais em paralelo com as duas primeiras, se criará um pack de baterias com 3,7V, capacidade de 9.000 mAh e corrente de 9.000 mA.



**Figura 30 - Pack de baterias ligadas em paralelo**

Uma nota importante de segurança: antes de se conectar qualquer célula ou baterias em paralelo, deve-se garantir que elas tenham tensões quase idênticas.

Se as tensões são muito diferentes, isto significa que uma célula está em um estado maior de carga do que o outro.

Quando se conecta células com tensões diferentes, a célula com tensão maior vai descarregar parte de sua energia nas células que estão com tensão menor.

Se a diferença de carga é grande, a célula mais carregada tentará despejar uma grande quantidade de energia de uma só vez dentro da célula de carga inferior.

Este fluxo de corrente alto irá danificar as duas células e pode resultar em células superaquecidas ou até pegando fogo.

Como exemplo, vamos imaginar que vamos ligar duas baterias em paralelo como mostrado na figura.

A primeira bateria está totalmente carregada com 4,2V e a segunda bateria está descarregada com 2,2V.

Vamos supor que as duas baterias tenham uma resistência interna de 10 mΩ ou 0,01Ω (R1 e R2).

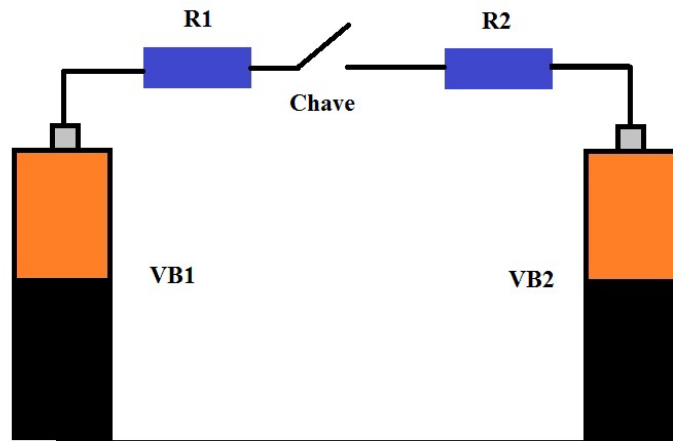


Figura 31 - Ligação paralela

Para calcular a corrente inicial (I) utiliza-se a lei de Ohm:

$$I = (VB1 - VB2) / (R1 + R2)$$

$$I = (4,2 - 2,2) / (0,01 + 0,01) = 100 \text{ A}$$

Essa corrente de 100A irá danificar as duas baterias mesmo que dure muito pouco tempo.

Na prática nem sempre a diferença de tensão é tão grande e nem as resistências internas são tão pequenas.

Mesmo assim, ao ligar duas baterias em paralelo haverá circulação de corrente até que a tensão entre as baterias seja equalizada.

Para que a corrente inicial seja a mais baixa possível, para que as células não sejam danificadas, certifique-se que as células têm tensões semelhantes ou idênticas antes de conectá-las em paralelo.

### 3.4 Seleção de Células Ligadas em Paralelo

Ao montar packs de baterias com células de lítio-íon, é comum conectar várias células em paralelo. Quando as células são conectadas em paralelo e cicladas a uma taxa alta de corrente, a equalização da resistência interna é importante para garantir uma vida útil longa da bateria.

A diferença na resistência interna das células ligadas em paralelo, se torna um problema importante para aplicações em que a bateria está sujeita a altas taxas C, e é necessário ter uma vida útil longa de muitas centenas a dezenas de milhares de

ciclos. Exemplos dessas aplicações incluem veículos híbridos e baterias de ferramentas elétricas.

O efeito prejudicial da incompatibilidade de resistência interna entre células conectadas em paralelo surge porque a diferença na resistência interna leva à distribuição desigual de corrente dentro das células e as correntes inesperadamente altas resultantes diminuem a vida útil da bateria.

Supondo que a chave da figura 31 esteja fechada e as duas baterias estejam ligadas em paralelo, a tensão em ambas as baterias será exatamente a mesma, logo após o transitório inicial de corrente.

Se houver um desequilíbrio de 20% na resistência interna das duas baterias haverá também um desequilíbrio nas respectivas correntes quando essas células forem recarregadas ou descarregadas.

Para ilustrar o problema, vamos imaginar um exemplo teórico. Na prática os valores reais podem ser bem diferentes dos que serão mostrados aqui.

Na prática existem outros fatores não considerados aqui, tais como efeito da temperatura no desempenho de cada célula, capacidades diferentes de cada célula, resistências ôhmicas das conexões do pack de baterias e outros fatores, mesmo assim, o exemplo teórico é bastante útil para mostrar a questão do desequilíbrio de correntes nas células ligadas em paralelo.

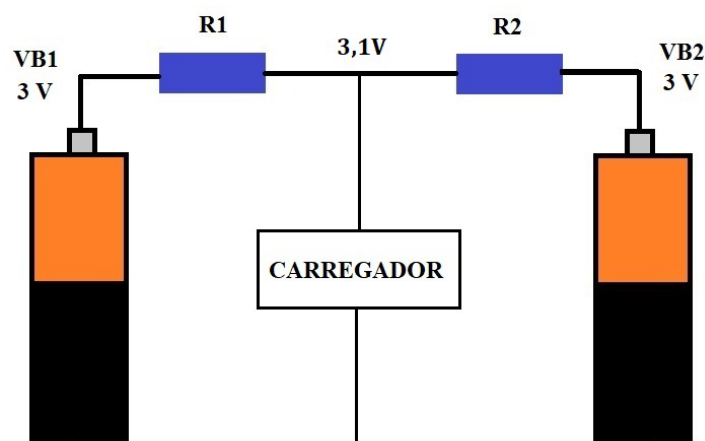


Figura 32 - Ligação paralela na carga

Por exemplo, na figura 32, se  $R1 = 10 \text{ m}\Omega$ ,  $R2 = 15 \text{ m}\Omega$  e a tensão inicial no carregador for de 3,1V e a tensão inicial das baterias for de 3V, teremos as seguintes correntes de recarga em cada bateria:

- Corrente na célula 1:  $I_1 = (3,1-3) / 0,010 = 10 \text{ A}$
- Corrente na célula 2:  $I_2 = (3,1-3) / 0,015 = 6,66 \text{ A}$

Ou seja, na recarga, o desequilíbrio nas correntes das duas células será de 3,33 A. A distribuição de corrente nas células conectadas em paralelo normalmente não é monitorada em baterias comerciais, a fim de reduzir a complexidade do pack de baterias e o custo da placa BMS.

A diferença na resistência interna em células conectadas em paralelo, também leva a um desequilíbrio ainda maior na corrente no fim do ciclo de descarga.

Na figura a seguir, supondo as baterias em início de descarga, vamos imaginar a seguinte situação:

- **Início de descarga:**

Célula 1: Resistência Interna  $R_1 = 10 \text{ m}\Omega$

Célula 2: Resistência Interna  $R_2 = 15 \text{ m}\Omega$

Corrente de saída do pack de baterias = 50 A

Tensão  $V_{B1} = 4,2\text{V}$

Tensão  $V_{B2} = 4,2\text{V}$

$I_1$  = Corrente na célula 1

$I_2$  = Corrente na célula 2

$V_{R1}$  = Tensão em  $R_1$

$V_{R2}$  = Tensão em  $R_2$

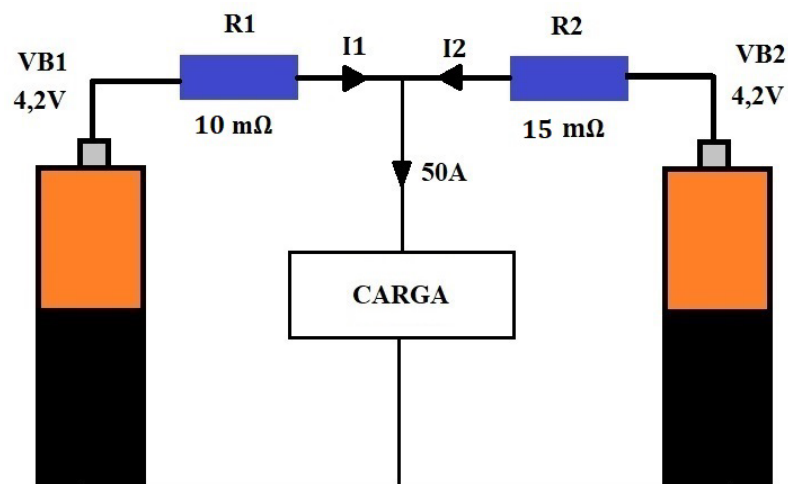


Figura 33 - Ligação paralela no início da descarga

Temos as seguintes equações:

$$I_1 + I_2 = 50 \text{ ou } I_1 = 50 - I_2 \text{ (equação 1)}$$

$$V_{B1} - V_{R1} = V_{B2} - V_{R2} \text{ (equação 2)}$$

Pela lei de ohm:  $V_{R1} = R_1 \times I_1$  e  $V_{R2} = R_2 \times I_2$

Então podemos reescrever a equação 2 da seguinte forma:

$$V_{B1} - R_1 \times I_1 = V_{B2} - R_2 \times I_2$$

$$4,2 - 0,010 \times I_1 = 4,2 - 0,015 \times I_2$$

Usando a equação 1 temos:

$$4,2 - 0,010 \times (50 - I_2) = 4,2 - 0,015 \times I_2$$

$$4,2 - 0,5 + 0,010 \times I_2 = 4,2 - 0,015 \times I_2$$

$$3,7 + 0,010 \times I_2 = 4,2 - 0,015 \times I_2$$

$$0,025 \times I_2 = 4,2 - 3,7$$

$$I_2 = 0,5 / 0,025 = 20 \text{ A}$$

$$I_1 = 50 - I_2 = 50 - 20 = 30 \text{ A}$$

Ou seja, há um desequilíbrio inicial na corrente de  $30 \text{ A} - 20 \text{ A} = 10 \text{ A}$  entre as duas células. A tensão na carga  $V_c$  pode ser calculada por:

$$V_c = V_{B1} - R_1 \times I_1 = 4,2 - 0,01 \times 30 = 3,90 \text{ V}$$

ou

$$V_c = V_{B2} - R_2 \times I_2 = 4,2 - 0,015 \times 20 = 3,90 \text{ V}$$

A resistência da carga  $R_c$  pode ser calculada por:

$$R_c = V_c / I = 3,90 / 50 = 0,078 \Omega$$

- **Fim de descarga:**

Supondo uma tensão de final de descarga de 3V para ambas as células, então teríamos:

Célula 1: Resistência Interna  $R_1 = 10 \text{ m}\Omega$

Célula 2: Resistência Interna  $R_2 = 15 \text{ m}\Omega$

Corrente de saída do pack de baterias em fim de descarga =  $I_c$

Tensão na carga =  $V_c$

Tensão  $V_{B1} = 3,0\text{V}$

Tensão  $V_{B2} = 3,0V$   
 $I_1$  = Corrente na célula 1  
 $I_2$  = Corrente na célula 2  
 $V_{R1}$  = Tensão em  $R_1$   
 $V_{R2}$  = Tensão em  $R_2$

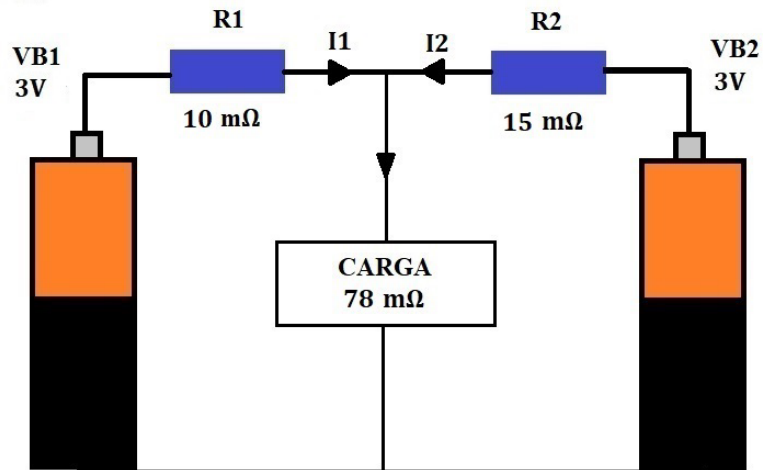


Figura 34 - Ligação paralela no final da descarga

Temos as seguintes equações:

$$V_{B1} - R_1 \times I_1 = (I_1 + I_2) \times R_c \text{ (equação 1)}$$

$$3,0 - 0,010 \times I_1 = (I_1 + I_2) \times 0,078$$

$$3,0 - 0,010 \times I_1 = 0,078 \times I_1 + 0,078 \times I_2$$

$$0,088 \times I_1 = 3,0 - 0,078 \times I_2$$

$$I_1 = (3,0 - 0,078 \times I_2) / 0,088$$

$$I_1 = 34,09 - 0,886 \times I_2$$

$$V_{B2} - R_2 \times I_2 = (I_1 + I_2) \times R_c \text{ (equação 2)}$$

$$3,0 - 0,015 \times I_2 = 0,078 \times I_1 + 0,078 \times I_2$$

$$3,0 - 0,093 \times I_2 = 0,078 \times I_1$$

Substituindo-se na equação 2 o valor calculado de  $I_1$  na equação 1 temos:

$$3,0 - 0,093 \times I_2 = 0,078 \times (34,09 - 0,886 \times I_2)$$

$$3,0 - 0,093 \times I_2 = 2,659 - 0,0692 \times I_2$$

$$0,341 = 0,0238 \times I_2$$

$$I_2 = 14,32 \text{ A}$$

Usando o valor calculado de  $I_2$  na equação 1, temos:

$$I_1 = 34,09 - 0,886 \times 14,32 = 21,40 \text{ A}$$

A tensão na carga é dada por:

$$V_c = V_{B1} - R_1 \times I_1 = 3,0 - 0,010 \times 21,40 = 2,786 \text{ V ou}$$

$$V_c = V_{B2} - R_2 \times I_2 = 3,0 - 0,015 \times 14,32 = 2,786 \text{ V ou}$$

$$V_c = (I_1 + I_2) \times R_c = (21,40 + 14,32) \times 0,078 = 2,786 \text{ V}$$

Ou seja, há um desequilíbrio na corrente de  $21,40 \text{ A} - 14,32 \text{ A} = 7,08 \text{ A}$  entre as duas células, no final da descarga. Assim verificamos que na descarga, o desequilíbrio de corrente pode ser ainda maior do que na recarga.

Isso leva ao envelhecimento prematuro da célula se ela não foi projetada para lidar com essa corrente alta.

Estudos mostram que uma diferença de 20% na resistência interna das células num pack de baterias com duas células ligadas em paralelo pode levar a uma redução de aproximadamente 40% na vida útil quando comparada a duas células conectadas em paralelo com resistência interna muito semelhante.

Para packs de baterias com maior número de células em paralelo a diferença nas resistências internas das baterias é ainda mais crítico.

Com mais células em paralelo envelhecendo de maneira diferente, após alguns ciclos, as diferenças nas resistências internas das células serão acentuadas, gerando ainda mais desequilíbrio de corrente e acelerando ainda mais a perda de capacidade do pack.

Portanto, antes de montar um pack de baterias, é altamente recomendável medir a resistência interna de cada célula e associar em paralelo aquelas células com tensão e resistência interna as mais próximas possíveis entre si.

### 3.5 Ligações em Paralelo e em Série

Até agora vimos que conexões série aumentam a tensão de uma bateria, mas não afetam a capacidade, enquanto conexões paralelas aumentam a capacidade da bateria, mas não afetam a tensão.

Então, como aumentar tanto a tensão bem como a capacidade simultaneamente? Simplesmente combinando conexões paralelas e em série.

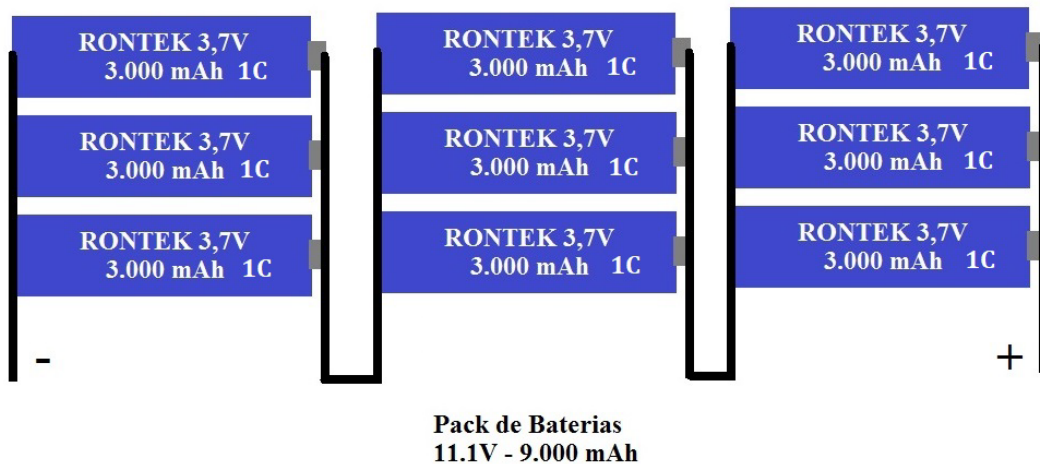


Figura 35 - Baterias ligadas em série e paralelo

No exemplo da figura acima, temos 3 conjuntos de células de 3,7V – 9.000 mAh e 1C (9.000 mA) ligadas em série. Cada conjunto é composto por 3 baterias ligadas em paralelo.

Sendo assim, cada conjunto de 3 baterias ligadas em paralelo, pode ser considerado uma única bateria de 3,7V - 9.000 mAh – 9.000 mA. Ligando-se estes 3 conjuntos em série obtêm-se 11.1V - 9.000 mAh – 9.000 mA.

Para falar sobre a montagem desses packs usamos abreviaturas. A ligação série é indicada por “s” e a ligação em paralelo é indicada por “p”. A bateria que criamos no exemplo acima poderia ser nomeada como uma bateria 3s3p, pois tem três conjuntos em série, sendo cada conjunto com três células em paralelo. Se usarmos as mesmas células do exemplo da figura 36 para criar uma bateria 10s4p, teríamos um pack de baterias de 37V 12Ah, que podemos calcular como:

$$\text{Tensão} = 10 \text{ células em série} \times 3.7\text{V por célula} = 37\text{V}$$

$$\text{Capacidade} = 4 \text{ células em paralelo} \times 3\text{Ah por célula} = 12\text{Ah}$$

$$\text{Corrente} = 4 \text{ células em paralelo} \times 3\text{A por célula} = 12\text{A}$$

Um pack de baterias 13s4p, usando células de Lítio-íon de 3.7V e 3.0Ah teria as seguintes especificações:

Total de tensão = 13 células em série x 3.7 V por célula = 48,1V

Capacidade total = 4 células em paralelo x 3Ah por célula = 12Ah

Corrente total = 4 células em paralelo x 3Ah por célula = 12 A

Existem duas formas de se ligar baterias em série e paralelo como mostrado na figura a seguir. No pack A da figura, primeiro liga-se as baterias em paralelo e depois em série. No pack B, primeiro liga-se as baterias em série e depois em paralelo.

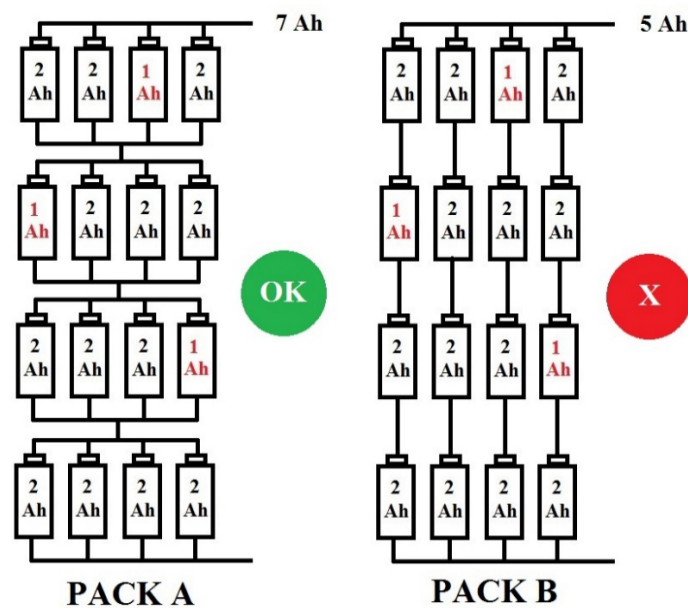


Figura 36 - Tipos de ligação em série e em paralelo

Se todas as baterias tivessem a mesma capacidade, as duas formas de se ligar as células seriam equivalentes. Porém na prática nem sempre isso ocorre. Quanto maior o número de células num pack de baterias, maior a probabilidade de haver células com capacidades diferentes.

No exemplo da figura se todas as células tivessem 2Ah, a capacidade do pack A e do pack B seria 8Ah. Porém, se em cada pack tivermos 3 células com a capacidade reduzida para 1Ah, o pack A teria 7Ah enquanto o pack B teria apenas 5Ah.

Portanto é preferível ligar primeiro as células em paralelo e depois colocar os conjuntos em série como no pack A.

### Quadro Comparativo: Ligações em Packs de Baterias

Tipo de Ligação	Como as células são ligadas	Impacto na Tensão (V)	Impacto na Capacidade (Ah)	Objetivo Principal
<b>Série (S)</b>	Terminal positivo no negativo da próxima	<b>Soma-se</b> a tensão de cada célula	<b>Mantém-se</b> igual à de uma célula	Aumentar a <b>voltagem</b> do sistema
<b>Paralelo (P)</b>	Positivo com positivo, negativo com negativo	<b>Mantém-se</b> igual à de uma célula	<b>Soma-se</b> a capacidade de cada célula	Aumentar a <b>autonomia</b> e a corrente

### 3.6 O Papel Crítico do BMS (Battery Management System)

- **Em ligações Série:** O monitoramento individual é obrigatório. Se uma célula descarregar antes das outras, ela pode ser danificada ou causar acidentes. O BMS faz o **balanceamento** para igualar as tensões.
- **Em ligações Paralelo:** As células se auto balanceiam em tensão. Porém, o BMS precisa monitorar a **corrente total**, pois células com defeito podem drenar energia das vizinhas (corrente parasita).

## Capítulo 4: Projeto de Packs de Baterias - Cálculos

O projeto de um pack de baterias normalmente começa com o cliente especificando alguns dos seguintes parâmetros:

- **Tensão Nominal (V)**
- **Capacidade do pack (mAh)**
- **Corrente média do pack (mA)**
- **Corrente de pico (mA)**
- **Potência da Carga (W)**
- **Energia do pack de baterias (Wh)**
- **Tempo de duração da energia do pack de baterias (horas)**
- **Tamanho do pack de baterias**

De posse desses dados o projetista deve escolher a célula que melhor se adapta às necessidades do cliente, calcular o número de células e sua forma de ligação (série ou paralelo) e calcular os parâmetros do pack projetado e verificar se esses parâmetros calculados estão dentro do especificado pelo cliente.

Para calcular esses parâmetros são necessárias algumas fórmulas, detalhadas a seguir.

### 4.1 Cálculo da tensão

A tensão de um pack de baterias é dada pela fórmula:

**Tensão do pack de baterias = Tensão da célula x N° de células em série**

Então por exemplo, se o cliente especifica um pack de baterias de lítio-íon de 18,5V, pode-se calcular o número de células pela fórmula:

**Número de células = Tensão do pack de baterias / Tensão da célula**

Se usarmos células de 3,7V de lítio-íon, teremos:

Número de células =  $18,5 / 3,7 = 5$  células em série

### 4.2 Cálculo da corrente

A corrente de um pack de baterias é dada pela fórmula:

**Corrente do pack = Corrente da célula x N° de células em paralelo**

Então por exemplo, se o cliente especifica um pack de baterias de lítio-íon de 10 A, pode-se calcular o número de células em paralelo pela fórmula:

**Nº de células em paralelo = Corrente do pack de baterias / Corrente da célula**

Se usarmos células de lítio-íon de 2.600 mA (2,6 A), teremos:

Número de células =  $10 / 2,6 = 3,84$  células em paralelo

Deve-se sempre arredondar esse número para cima, obtendo-se 4 células em paralelo.

Esse cálculo vale tanto para calcular a corrente média do pack de baterias (ou nominal), bem como para calcular a corrente de pico do pack de baterias.

#### **4.3 Cálculo da capacidade**

A capacidade de um pack de baterias é dada pela fórmula:

**Capacidade do pack de baterias = Capacidade da célula x Número de células em paralelo**

Então por exemplo, se o cliente especifica um pack de baterias de lítio-íon de 5.000 mAh, pode-se calcular o número de células pela fórmula:

**Número de células em paralelo = Capacidade do pack de baterias / Capacidade da célula**

Se usarmos células de lítio-íon de 2.600 mAh, teremos:

Número de células =  $5.000 / 2.600 = 1,92$  células em paralelo

Deve-se sempre arredondar esse número para cima, obtendo-se 2 células em paralelo.

#### 4.4 Cálculo da potência

Um pack de baterias deve ser capaz de fornecer a potência requerida pela carga elétrica alimentada por ele. A potência do pack de baterias deve ser igual ou superior à potência requerida pela carga.

A potência de uma carga elétrica em corrente contínua é calculada pela equação:

$$P = V \times I$$

Onde:

- **I = Corrente (A)**
- **P = Potência (W)**
- **V = Tensão (V)**

Por exemplo, se o cliente precisa alimentar uma carga elétrica de 50 W em 12V, a corrente que esse pack deverá fornecer pode ser calculado por:

$$I = P / V = 50 \text{ W} / 12 \text{ V} = 4,17 \text{ A}$$

#### 4.5 Cálculo da energia

A energia fornecida por uma bateria pode ser calculada pela fórmula:

$$E = P * T$$

Onde:

- **E = Energia (Wh)**
- **P = Potência (W)**
- **T = Tempo (h)**

Se considerarmos que a potência é calculada por:

$$P = V * I$$

Onde:

- **P = Potência (W)**
- **V = Tensão (V)**
- **I = Corrente (A)**

Temos a seguinte fórmula para cálculo da energia:

$$E = P * T = V * I * T$$

Se considerarmos que:

$$I * T = C$$

Onde:

- **I = Corrente (A)**
- **T = Tempo (h)**
- **C = Capacidade (Ah)**

Temos:

$$E = V * I * T = V * C$$

Por exemplo um pack de 12V e capacidade de 2.600 mAh (2,6 Ah) tem uma energia de:

$$E = V * C = 12V * 2,6Ah = 24,64 Wh$$

#### 4.6 Cálculo do tempo de duração da energia

Para calcular a duração de uma bateria temos a seguinte equação:

$$T = C / I$$

Onde:

- **T = Tempo (h)**
- **C = Capacidade (Ah)**
- **I = Corrente (A)**

Por exemplo, se temos uma bateria de 2Ah, alimentando um equipamento com corrente de 0,5A, a duração é calculada dividindo-se a capacidade da bateria pela corrente do equipamento, ou seja:

$$\text{Tempo de duração} = 2Ah / 0,5A = 4 \text{ horas.}$$

Na prática, perde-se parte da energia. Por isso, deve-se estimar uma redução na duração. No exemplo, estimamos que a bateria dure apenas 90% do tempo calculado, ou seja, 3,6 horas. A estimativa da redução do tempo de duração é feita com base nas curvas de descarga da bateria, fornecidas pelo fabricante. Em alguns casos, não se conhece a corrente do equipamento, mas apenas sua potência e tensão. Por exemplo, se temos uma bateria de 2000 mAh (2Ah) alimentando um equipamento de 48 watts e 12 volts, a corrente, é calculada por:

$$I = P / V$$

Onde:

- **I = Corrente (A)**
- **P = Potência (W)**
- **V = Tensão (V)**

$$\text{Corrente} = \text{Potência} / \text{Tensão} = 48\text{W} / 12\text{V} = 4 \text{ A} = 4.000 \text{ mA}$$

E agora, sabendo que a capacidade da bateria é 2000 mAh, e a corrente do equipamento é de 4000 mA, podemos calcular a duração da bateria:

$$T = C / I$$

Onde:

- **T = Tempo (h)**
- **C = Capacidade (Ah)**
- **I = Corrente (A)**

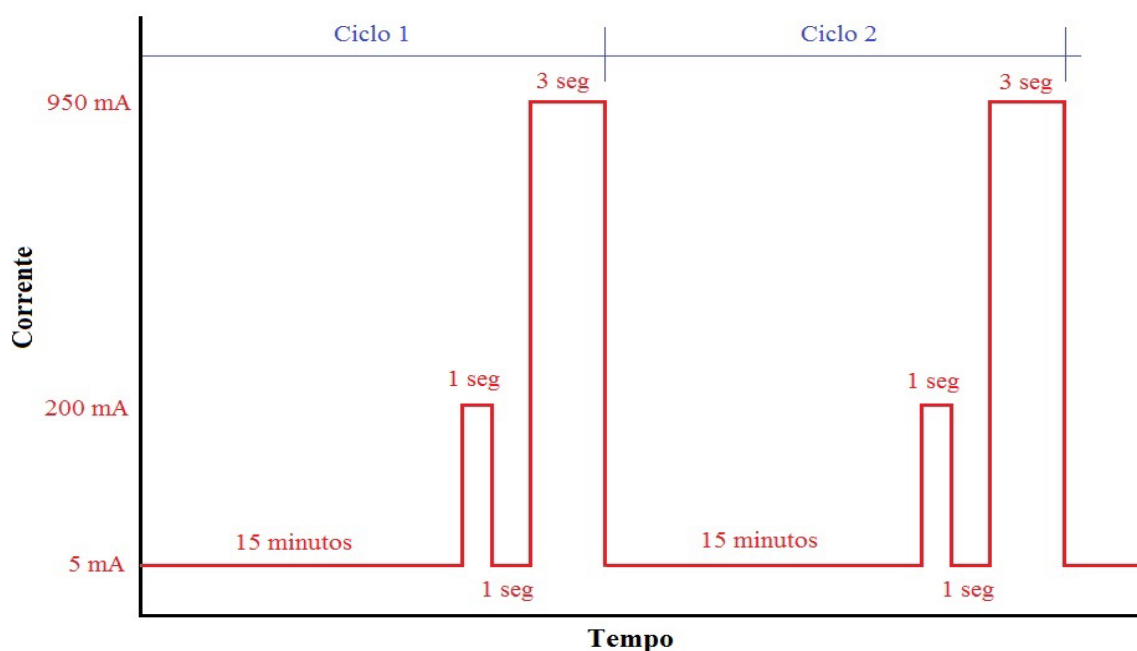
$$\text{Tempo de duração} = 2\text{Ah} / 4\text{A} = 0,5 \text{ horas.}$$

Estimando uma redução da duração para 90%, a bateria irá durar, 27 minutos.

#### **4.7 Cálculo da corrente média em função do ciclo de trabalho**

Na prática, é difícil encontrarmos equipamentos que consomem uma corrente constante durante todo o tempo. Os equipamentos normalmente têm um ciclo de trabalho intermitente onde a corrente varia com o tempo. Por exemplo, na figura 37 temos a curva de corrente de um equipamento de telemetria. Esse equipamento trabalha com três níveis de corrente, dependendo da tarefa que está executando:

- Nível de corrente 1 – Em repouso – Consumindo muito pouca energia, apenas o necessário para se manter ligado – 5 mA durante 15 minutos;
- Nível de corrente 2 – Leitura dos sensores que estão sendo monitorados e processamento desses sinais. Neste caso a corrente sobe porque o equipamento precisa de mais energia para poder ler e processar os sinais dos sensores – 200 mA durante 1 segundo;
- Nível de corrente 3 – Em transmissão – Transmitindo os dados lidos. Aqui o consumo de corrente é maior ainda – 950 mA durante 3 segundos.



**Figura 37 – Ciclo de trabalho intermitente**

A capacidade requerida da bateria durante um ciclo é dada por:

$$C = I_1 \times T_1 + I_2 \times T_2 + I_3 \times T_3 + I_4 \times T_4 / (T_1 + T_2 + T_3 + T_4)$$

Onde:

- C = Capacidade (mAh)
- I1, I2, I3 e I4 = Corrente (mA)
- T1, T2, T3 e T4 = Tempo (seg)

As correntes podem ser todas em A ou mA e os tempos todos em segundos ou minutos. Para facilitar os cálculos usaremos as correntes em mA e os tempos em segundos, lembrando que 15 minutos possuem 900 segundos.

$$C = 5\text{mA} \times 900\text{s} + 200\text{mA} \times 1\text{s} + 5\text{mA} \times 1\text{s} + 950\text{mA} \times 3\text{s} = 7.555 \text{ mAs (miliampère segundo)}$$

A corrente média do pack de baterias durante um ciclo é calculada por:

$$I = C / (T_1+T_2+T_3+T_4)$$

Onde:

- **I = Corrente (mA)**
- **C = Capacidade (mAs)**
- **T1, T2, T3 e T4 = Tempo (s)**

$$I = 7.555 \text{ mAs} / (900 + 1 + 1 + 3) \text{ s} = 8,348 \text{ mA}$$

Se alimentarmos esse equipamento com uma bateria de lítio cloreto de tionila –  $\text{SOCl}_2$  – de 3,6V e 19,000 mAh – tamanho D, teremos um tempo de duração da bateria calculado por:

$$\text{Tempo de duração} = 19.000 \text{ mAh} / 8,348 \text{ mA} = 2.276 \text{ horas ou } 94,83 \text{ dias.}$$

Considerando os efeitos da temperatura e autodescarga pode-se estimar uma redução do tempo de duração da bateria em 10%. Sendo assim a bateria irá durar aproximadamente:

$$94 \text{ dias} - 10\% = 84 \text{ dias.}$$

Esse tipo de cálculo é aproximado, já que na prática é difícil estimar os efeitos da temperatura no equipamento e na bateria e nem sempre o ciclo de trabalho do equipamento é tão bem-comportado como mostrado na figura 37.

Porém esse método, os cálculos servem para uma estimativa e podem ser ajustados usando valores mais ou menos conservadores para a redução do tempo de duração da bateria.

## Capítulo 5: Placa de Proteção (BMS – Battery Management System)

Sistemas de gerenciamento de bateria (BMS), ou como são menos comumente conhecidos, módulos de circuito de proteção (PCMs) ou placas de circuito de proteção (PCB), são circuitos que devem ser adicionados a uma bateria de Lítio-íon para proteger a saúde das células individuais na bateria e prolongar a sua vida útil.

Sistemas de gerenciamento de baterias controlam a carga e a descarga das baterias, otimizando sua utilização para aumentar a sua eficiência, segurança e vida útil.

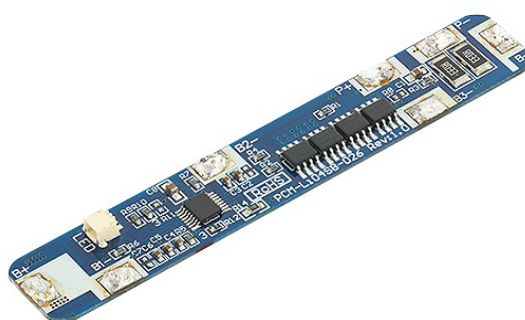


Figura 38 - Placa de proteção de baterias Lítio-íon – BMS

### 5.1 Funções Vitais e Arquitetura de Proteção

As placas mais básicas têm pelo menos as seguintes funções:

- **Proteção contra sobre tensão na carga**

Para garantir o uso seguro, as células de lítio-íon devem operar dentro de parâmetros de tensão muito rigorosos. Dependendo do fabricante e da composição química da célula, esse parâmetro de tensão máxima varia na carga entre 4,2 V por célula e 4,25 V por célula.

A placa PCM monitora esses parâmetros de tensão e se forem excedidos, providencia a desconexão da bateria da carga ou do carregador.

- **Proteção contra subtensão na descarga**

Para garantir o uso seguro, as células de lítio-íon nunca devem ser descarregadas abaixo da sua tensão mínima. Dependendo do fabricante e da composição química da célula, esse parâmetro de tensão mínima varia na descarga entre 3,0 V e 2,5 V por célula.

A placa PCM monitora esses parâmetros de tensão e se forem excedidos, providencia a desconexão da bateria da carga ou do carregador.

- **Proteção contra sobre corrente na descarga**

A placa monitora a corrente de descarga. Se essa corrente excede o valor especificado a placa interrompe o processo de descarga.

- **Proteção contra inversão de polaridade**

Se a polaridade do carregador for invertida, a placa BMS interrompe o processo de carga.

Além dessas especificações mínimas existem placas BMS bem complexas que executam muitas outras funções de proteção.

- **Proteção contra sobre corrente na descarga**

A corrente de carga não deve ser muito alta, normalmente abaixo de 0,7C.

- **Monitoramento**

Em placas BMS utilizadas em aplicações mais complexas, como por exemplo veículos elétricos, existem circuitos que devem prover para o usuário as informações dos parâmetros da bateria, como potência máxima e carga útil, de forma a permitir o uso inteligente da energia disponível.

Para aplicações industriais (AGVs, BESS, Empilhadeiras), a arquitetura de proteção do BMS deve ser redundante e multinível. As principais funções/características são:

- Monitoramento de Tensão por Célula (Cell Voltage Monitoring - CVM)  
Diferente de sistemas de chumbo-ácido, o lítio exige precisão de milivolts.
- Proteção contra sobretensão - OVP (Over-Voltage Protection): Impede a decomposição do eletrólito. Em células NMC, o corte ocorre em ~4.25V; em LiFePO4, em ~3.65V.
- Proteção contra subtensão - UVP (Under-Voltage Protection): Evita a dissolução do coletor de corrente de cobre. Se a tensão cair abaixo do limite (ex: 2.5V), o BMS desconecta a carga para evitar danos químicos irreversíveis.

- **Precisão Industrial:** Um BMS de classe industrial deve ter uma precisão de leitura de pelo menos  $\pm 5\text{mV}$  a  $\pm 10\text{mV}$  para garantir que o balanceamento seja eficaz.
- **Proteção de Corrente e Gerenciamento de Curto-Circuito**  
A medição de corrente é feita via Shunt (resistor de precisão) ou Sensor de Efeito Hall.
- **Proteção contra sobrecorrente - OCP (Over-Current Protection):** Proteção contra sobrecarga contínua (ex: motor travado). O BMS atua após um tempo de retardo (delay) configurável.
- **Proteção contra curto-circuito - SCP (Short-Circuit Protection):** Proteção ultrarrápida (microsegundos). Em caso de curto direto, o BMS deve abrir o circuito antes que os cabos ou as células sofram danos estruturais.
- O BMS industrial deve ser coordenado com o fusível físico do pack para garantir seletividade na proteção.
- **Monitoramento Multizona de Temperatura (OTM)**

Em packs industriais densos, a temperatura não é uniforme. Pelo menos um sensor NTC para cada 4-8 células em série, além de sensores nos MOSFETs de potência e nos barramentos principais.

- **Proteção contra sobretemperatura - OTP (Over-Temperature Protection):** Interrompe a operação se o núcleo do pack exceder limites (geralmente  $>60^{\circ}\text{C}$  na descarga ou  $>45^{\circ}\text{C}$  na carga).
- **Proteção contra subtemperatura - UTP (Under-Temperature Protection):** Vital para climas frios. Nunca carregue baterias de lítio abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ , pois ocorre o fenômeno de *Lithium Plating* (deposição metálica), que pode causar curto-circuito interno meses depois.
- **Estimativa de SoC (State of Charge) e SoH (State of Health)**
- **SoC (Carga):** Calculado via *Coulomb Counting* (contagem de Ah que entram e saem) integrado com a leitura de tensão em repouso. Essencial para a telemetria da planta industrial.

- SoH (Saúde): Compara a capacidade atual com a nominal de fábrica. Ajuda a prever quando o pack precisará de substituição preventiva (Manutenção Preditiva).
- Arquitetura de Segurança: Redundância (Hardware vs. Software)  
Um BMS industrial robusto possui dois níveis de proteção:
  1. Nível 1 (Software): O microcontrolador lê os dados e desliga os MOSFETs/Contatores.
  2. Nível 2 (Hardware - Segundo Corte): Um CI de proteção secundário e independente que monitora as tensões. Se o microcontrolador travar e uma célula sobrecarregar, este CI queima um fusível químico (Self-Control Fuse) ou desliga o sistema permanentemente.

No contexto industrial, o balanceamento não é apenas uma função estética de nivelamento de tensão; é uma estratégia de extensão de ativos. Em packs com centenas de células, a autonomia total é limitada pela célula de menor capacidade. Sem um balanceamento eficaz, o pack "envelhece" na velocidade da sua pior célula.

## 5.2 Balanceamento de Células

O desequilíbrio de tensão nas células, ocorre devido a pequenas variações de Resistência Interna (IR) e Autodescarga entre as células. Se não corrigido, algumas células atingirão o corte de subtensão (UVP) enquanto outras ainda possuem carga, reduzindo a energia útil do sistema.

No caso de uma única célula ou de múltiplas células ligadas em paralelo, isso é muito simples de ser feito, já que a placa PCM monitora uma única tensão. Porém quando se ligam várias células em série, a placa PCM deve monitorar a tensão individual de cada célula.

As células não são exatamente iguais. Tem resistências internas diferentes, tem estados iniciais de carga diferentes e, além disso, as células envelhecem de maneira diferente ao longo do tempo. A incompatibilidade de células é uma causa comum de falha em baterias industriais. As células ficarão desbalanceadas, ou seja, terão estados diferentes de carga e tensão.

Fabricantes de ferramentas elétricas profissionais e equipamentos médicos são cuidadosos com a escolha de células para obter boa confiabilidade da bateria e longa vida útil.

Uma solução para atenuar esse problema seria usar células novas, de um mesmo lote de fabricação, de forma a ter no pack de baterias, células com

características as mais próximas possíveis entre si. Porém, mesmo células de fabricantes excelentes, não são exatamente iguais e, portanto, esse procedimento por si só não resolve o problema.

Um pack de baterias com células de boa qualidade, com conexões elétricas bem-feitas, terá células com resistências quase idênticas. Isso faz com que as células fiquem balanceadas. No entanto, em níveis mais elevados de correntes, nem a boa qualidade células garante o balanceamento das células.

Para packs de baterias de alta tensão concebidos para cargas pesadas e uma ampla gama de temperaturas deve-se reduzir ainda mais a tolerância da capacidade.

Existe uma forte correlação entre o equilíbrio celular e a longevidade.

Para células de baixa qualidade, com grandes diferenças na resistência interna, ou mesmo para packs de baterias feitas com células de boa qualidade, mas com ligações elétricas pobres, as células podem começar a perder o balanceamento após alguns ciclos de carga.

A tolerância de capacidade entre as células de uma bateria industrial deve ser de +/- 2,5%.

Realizando-se ensaios em diferentes packs de baterias lítio-íon com diferentes níveis de desbalanceamento de células conclui-se que quanto maior for o desbalanceamento das células num pack, maior será a perda de capacidade após alguns ciclos de carga e descarga.

A figura 39 mostra a perda de capacidade do pack em função do desbalanceamento das células.

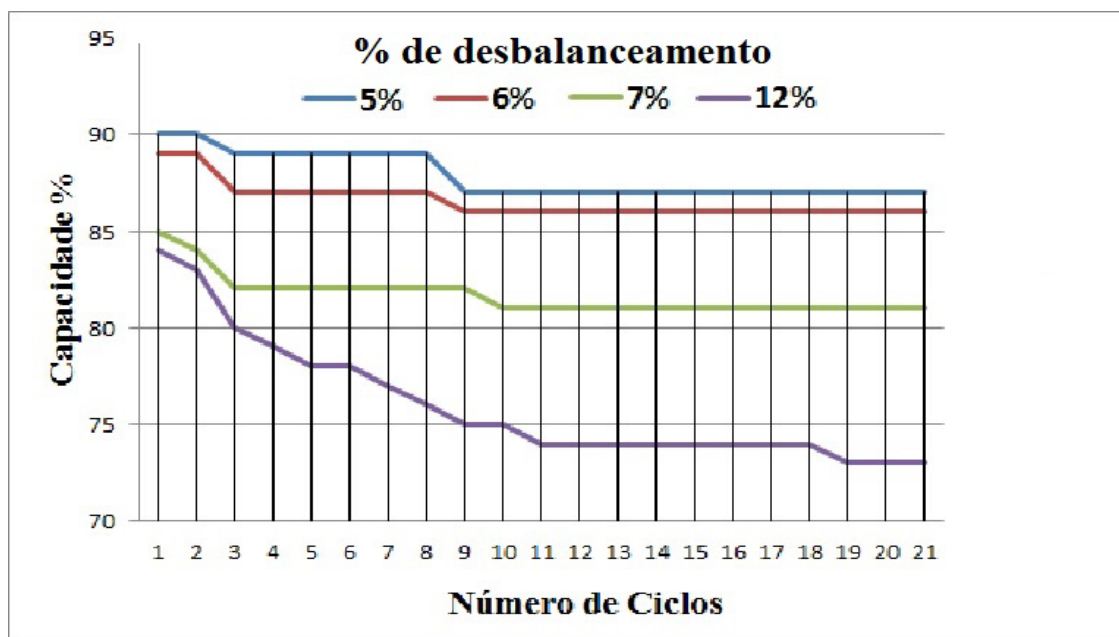


Figura 39 - Capacidade em packs desbalanceados

Placas PCM que não possuem a função de balanceamento, apenas monitoram a tensão de cada célula e quando a tensão de uma das células excede o valor inferior na descarga ou o valor superior na carga, ocorre a desconexão da bateria do carregador ou da carga.

Por exemplo, no caso de um pack de baterias de lítio-íon com três células conectadas em série, durante o ciclo de carga, se qualquer uma das células atingir seu limite superior de tensão, a placa PCM desconectará automaticamente o pack do carregador, encerrando assim todo o processo de carregamento, independentemente do estado de carga das outras duas células.

Dependendo da disparidade nas tensões das células usadas no pack de baterias, essa situação pode resultar em um pack de baterias que nunca atinge a carga total, diminuindo assim o seu desempenho e o tempo de uso do equipamento alimentado por essa bateria.

Da mesma forma, durante a descarga, se qualquer uma das três células atingir seu limite de tensão mais baixo, a placa PCM desconectará a carga e encerrará o processo de descarga, independentemente dos estados de carga das outras duas células.

Em outras palavras, um pack de baterias só funcionará tão bem quanto sua célula mais fraca. Num pack de baterias com poucas células esse problema pode ser aceito e se pode utilizar placas BMS mais simples e baratas.

Porém em veículos elétricos, onde cada pack de baterias contém centenas de células, seria absurdo construir um pack de baterias cujo desempenho fosse determinado pelo desempenho da célula mais fraca.

As células de Lítio-íon de qualidade têm capacidade uniforme e autodescarga baixa quando novas. A adição de balanceamento de células é benéfica especialmente à medida que o pack de baterias envelhece e o desempenho de cada célula diminui em seu próprio ritmo.

Para evitar esse desequilíbrio entre as células, o uso de placas PCM com circuitos de balanceamento é altamente recomendável.

A principal dificuldade no gerenciamento dos packs de baterias é a determinação do estado de carga das células (SoC – State of Charge – Estado de Carga) das células, assim como o correto balanceamento ou equalização das células. O estado de carga mostra a capacidade da célula num determinado momento.

Durante a operação de um pack de baterias os estados de carga de suas células podem desbalancear, devido às diferenças entre as células, ao tempo de armazenamento e o envelhecimento.

Se as baterias forem utilizadas sem um sistema de balanceamento, a tendência é que a bateria se torne mais desbalanceada com o passar do tempo, o que acarreta numa redução significativa da capacidade útil da bateria como mostrado na figura 39.

Ao consumir a carga armazenada em determinadas células ou em transferir a carga entre as células, o balanceamento faz com que todos os estados de carga das células do pack de baterias fiquem com valores similares, fazendo com que se consiga extrair o máximo de capacidade possível do pack de baterias.

Equalizar ou balancear as células significa extrair menos corrente das células com menor capacidade e extrair mais corrente das células com maior capacidade.

O controle de balanceamento depende da estimativa do estado de carga das células. Sistemas simples de balanceamento apenas equalizam as tensões nas células, admitindo que se todas as células estiverem em tensões similares, elas estarão balanceadas, com estados de carga similares. Porém diferenças nas capacidades, resistências internas, idade e envelhecimento das células, fazem com que a tensão não seja por si uma ótima maneira de estimar o real estado de carga da célula. Utilizando as medidas de tensão e corrente nas células e através de modelos matemáticos é possível estimar o estado de carga das células com maior precisão. Em geral os sistemas de balanceamento de bateria podem ser classificados em três grupos:

- **Passivo**
- **Ativo**

#### **A- Balanceamento Passivo (Dissipativo)**

É a tecnologia padrão para a maioria dos BMS de baixa e média potência.

- Funcionamento: Quando uma célula atinge uma tensão próxima ao máximo (ex: 3.60V para LFP), o BMS aciona um pequeno resistor em paralelo com ela. O excesso de energia é convertido em calor.
- Corrente de Balanceamento: Geralmente baixa, entre 30mA e 150mA.
- Prós: Baixo custo, circuito simples e alta confiabilidade eletrônica.
- Contras: Gera calor dentro do pack (o que pode degradar células vizinhas se mal projetado) e é ineficiente para células de alta capacidade (>100Ah), pois levaria dias para corrigir um desvio significativo.
- Uso Industrial: Baterias de ferramentas elétricas, e-bikes e sistemas de backup de pequeno porte.

#### **B- Balanceamento Ativo (Transferência de Carga)**

Tecnologia essencial para sistemas de alta performance e grande escala (BESS e Veículos Pesados).

- Funcionamento: Utiliza conversores DC-DC minúsculos (baseados em capacitores ou indutores) para retirar energia das células com maior tensão e injetá-la nas células com menor tensão.
- Corrente de Balanceamento: Alta, variando de 1A a 10A.

- Prós: Quase não gera calor (eficiência >90%), funciona durante a carga, descarga e até em repouso. É capaz de "recuperar" packs com células bastante desequilibradas.
- Contras: Circuito muito mais complexo e caro; maior risco de falha eletrônica se não houver isolamento galvânico adequado.
- Uso Industrial: Ônibus elétricos, sistemas de armazenamento de energia em containers (Megapacks) e empilhadeiras de regime 24/7.

No balanceamento passivo, resistores ou outros componentes eletrônicos são utilizados para consumir a carga de células específicas, ao passo que para o balanceamento ativo conversores de tensão (conversores CC/CC) são utilizados para transferir carga entre as células. O balanceamento por chaveamento conecta ou desconecta as células a uma ou mais cargas de modo a equalizar os estados de carga sem que a carga seja diretamente transferida entre as células.

Vale notar que enquanto no balanceamento passivo a carga é dissipada, no balanceamento por chaveamento ela é consumida pelo sistema a ser alimentado pela bateria, aumentando, assim, o aproveitamento da energia da bateria. O segredo de uma boa placa BMS está no algoritmo de controle de balanceamento do estado de carga das células do pack de baterias.

Um algoritmo adequado de balanceamento depende necessariamente de estimativas do estado de carga de cada célula. Então saber estimar o estado de carga de cada célula é fundamental para resolver o problema.

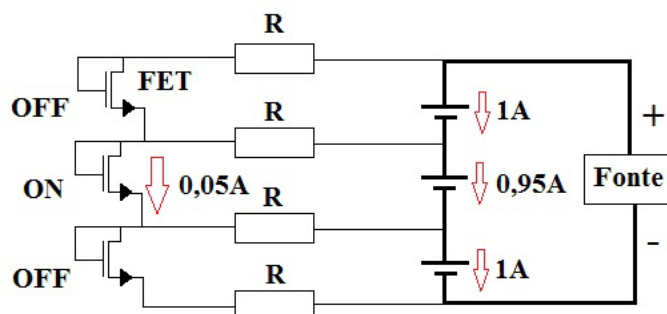
Na prática o que se tem disponível é a medida de tensão e corrente de cada célula. Tendo essas informações deve-se usar um modelo matemático (software) que calcula o estado de carga a partir da corrente e tensão e então enviar informações ao controlador do pack de baterias para proceder ao balanceamento de forma adequada.

O desenvolvimento deste modelo matemático é bastante complexo principalmente porque as baterias não envelhecem de maneira igual ao longo do tempo. Os passos necessários ao desenvolvimento de uma placa BMS que consiga controlar um pack de baterias com centenas de células são os seguintes:

- Desenvolvimento de um algoritmo de controle de balanceamento do estado de carga das células
- Desenvolvimento e análise da estabilidade do sistema de controle do pack de baterias.
- Desenvolvimento de um modelo para as células de uma bateria de íon de lítio e verificar experimentalmente se esse modelo realmente consegue prever os estados de carga das células.
- A partir do modelo das células, desenvolver um estimador adequado para o estado de carga quando os parâmetros da célula são conhecidos.

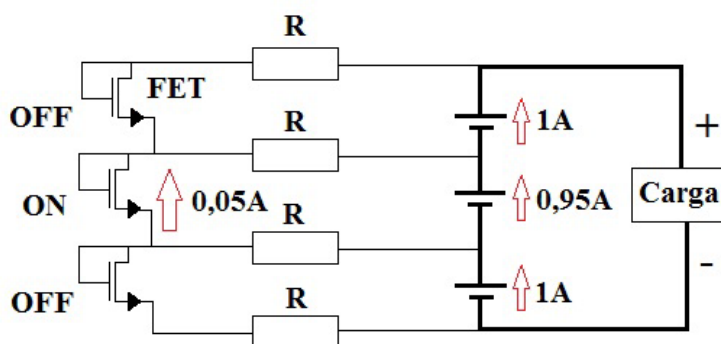
- Desenvolver simulações e experimentos para validação dos algoritmos e métodos.
- Desenvolver um estimador para o estado de carga e dos parâmetros de uma célula quando esses parâmetros são desconhecidos (placas BMS de uso geral).

Os circuitos de balanceamento de células usados nas placas PCM são projetados com FET'S, como se fossem chaves liga-desliga, que podem desviar parte da corrente de cada célula, tanto na carga como na descarga (figuras 40 e 41). Com isso a placa PCM com a função de balanceamento consegue manter todas as células sempre com tensão similar fazendo com que todas as células sejam carregadas e descarregadas até os valores máximos permitidos, conseguindo-se assim o desempenho máximo para o pack de baterias.



**Balanceamento na Carga**

**Figura 40 - Placa de proteção de baterias Lítio-íon – BMS – Balanceamento na carga**



**Balanceamento na descarga**

**Figura 41 - Placa de proteção de baterias Lítio-íon – BMS – Balanceamento na descarga**

Existem carregadores de balanceamento que monitoram cada grupo células em série e que promovem o balanceamento durante o processo de carga. Porém

carregadores simples, que aplicam uma tensão no pack, não conseguem fazer com que todas as células sejam carregadas com a mesma tensão.

Algumas células ficarão sobrecarregadas, com tensão superior e outras ficarão com tensão inferior e um estado mais baixo de carga. Essas células vão ser drenadas ainda mais da próxima vez que o pack for descarregado, causando danos irreparáveis a essas células.

Em seguida, as células de tensão mais elevada vão ser carregadas com mais de 4.2 V (a tensão adequada de carga completa para Lítio-íon) ou 3.65 V (a tensão adequada de carga completa para LiFePO<sub>4</sub>).

Passar qualquer quantidade de tempo acima da tensão máxima causará danos irreparáveis para as células.

O desbalanceamento de células é também uma condição degenerativa. Como as células tornam-se desequilibradas, elas suportam uma quantidade desproporcional da carga, que faz com que elas se tornem mais desequilibradas até que a bateria se destrói.

O que podemos fazer para impedir que as células se tornem desequilibradas após muitos ciclos de carga?

Uma opção é usar um carregador de balanceamento, como mencionado acima. Carregadores de balanceamento são comumente usados para baterias Li-Po. Os carregadores de balanceamento além de carregar os packs de baterias como um todo também possuem fios menores que são conectados a cada célula, ou grupo de células em paralelo. As placas BMS permitem que um carregador simples seja usado para carregar um pack de baterias.

A placa BMS situa-se entre o carregador simples e as células de bateria e regula as células. Ela permite que a tensão total do pack de baterias fornecida pelo carregador simples, chegue nas células de maneira adequada.

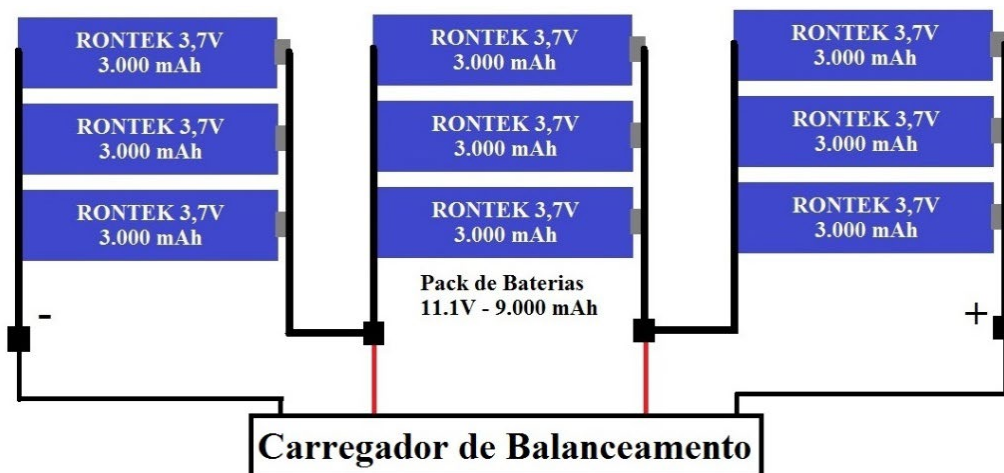


Figura 42 - Carregador de balanceamento

A placa BMS basicamente faz o trabalho de um carregador de balanceamento, mas em vez de residir no carregador, geralmente é instalada no interior da bateria sob a forma de uma placa de circuito separada.

Placas BMS maiores, por outro lado, muitas vezes têm seus próprios compartimentos em separado, para ajudar a dissipar o calor causado pelo processo de balanceamento. O fato de que a BMS está sempre conectada à bateria fornece alguns benefícios significativos.

Quase todas as placas BMS também possuem um circuito de proteção para descarga. Porque elas estão conectadas a cada célula ou grupo de células, elas monitoram a tensão de cada célula.

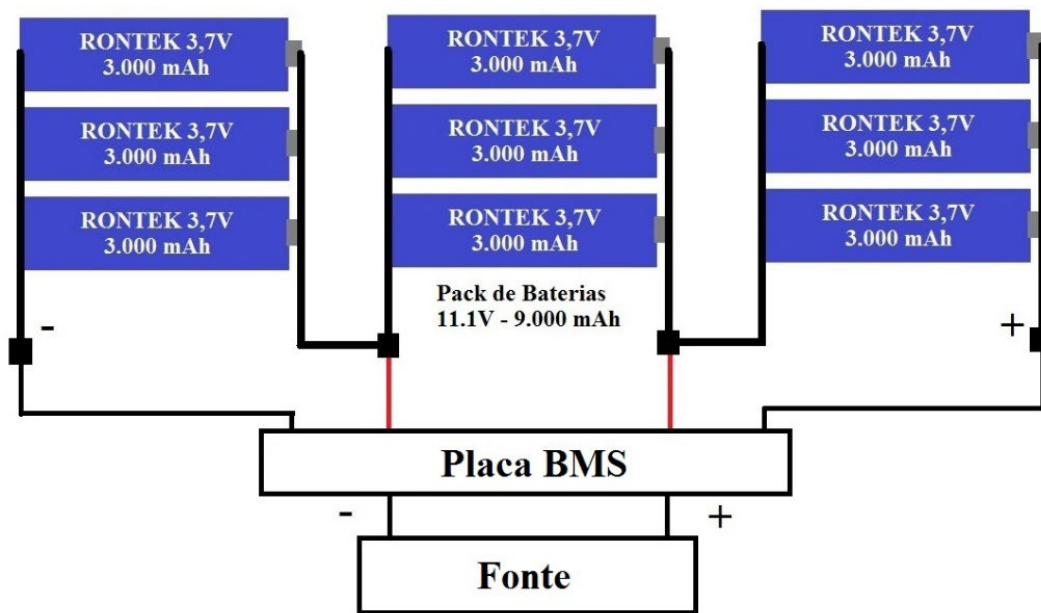


Figura 43 - Placa BMS de proteção

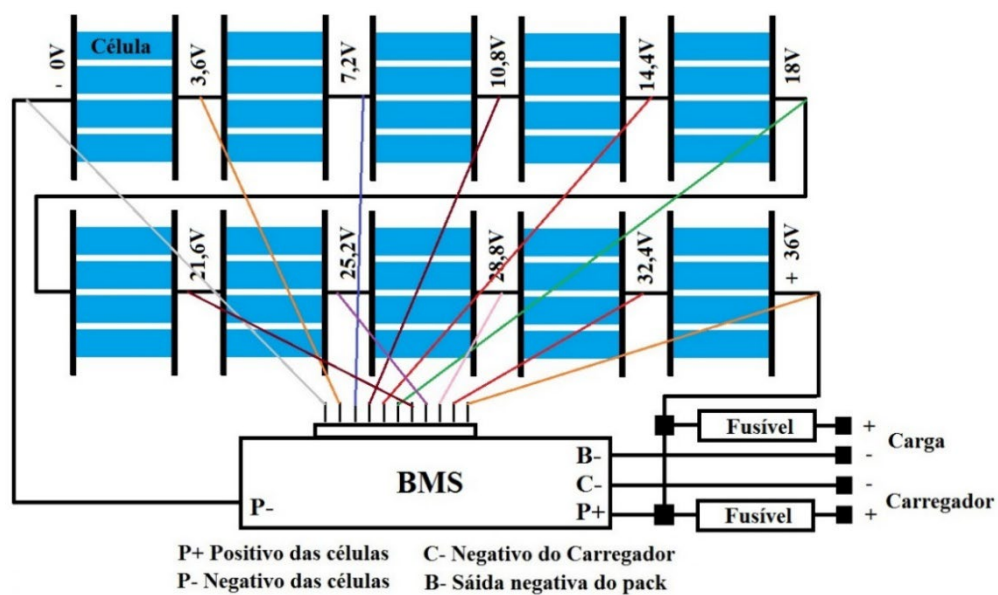


Figura 44 - Placa BMS com balanceamento

Sempre que a primeira célula atinge a tensão mínima de corte, a placa BMS vai cortar o circuito de descarga e interromper a descarga da bateria.

Isto protege as células da bateria de serem descarregada além do mínimo o que produziria danos irreparáveis.

Além disso, a placa BMS também protege o pack de baterias contra corrente de descarga excessiva. A placa BMS corta a energia da bateria se a carga da bateria exceder um determinado limiar. A placa BMS também protege contra curto-circuito.

### 5.3 Proteção contra temperatura excessiva

Algumas placas BMS têm proteção térmica incorporada, onde uma sonda de temperatura monitora a temperatura instantânea e pode parar o processo de carga ou descarga, se a bateria ficar quente demais.

O sensor de temperatura é colocado contra as células da bateria, onde será mais sensível a um aumento repentino na temperatura da célula.



Figura 45 – Sensor NTC de temperatura

Uma das principais desvantagens das placas BMS é que elas podem falhar ocasionalmente, e quando isso acontece, muitas vezes ela causa o problema que ela foi construída para evitar.

Uma placa BMS que falha pode drenar lentamente as células em uma bateria, muitas vezes, a uma taxa que se torna imperceptível para o usuário. Isso pode resultar em danos nas células, tornando-as degradadas ou destruídas ao longo do tempo, ou muito rapidamente, dependendo do tipo de falha.

Baterias que são produzidas em massa com ênfase na redução de custos ou baterias de procedência desconhecida, são mais propensas a ter esses problemas devido a terem placas BMS baratas, com padrões de controle de qualidade pobre.

Às vezes, fabricantes tentam reduzir o custo das baterias já caras usando placas BMS mais baratas. Isso resulta em uma morte prematura da bateria, quando a placa BMS de baixa qualidade falha. Packs de bateria de qualidade devem ter células de qualidade bem como placas BMS de qualidade.

A bateria não deve ser carregada quando a temperatura é inferior a 0°C ou superior a 45°C. Em packs com muitas células, a placa BMS monitora a

temperatura de várias células e controla a corrente de carga e descarga de forma a manter a temperatura em limites aceitáveis.

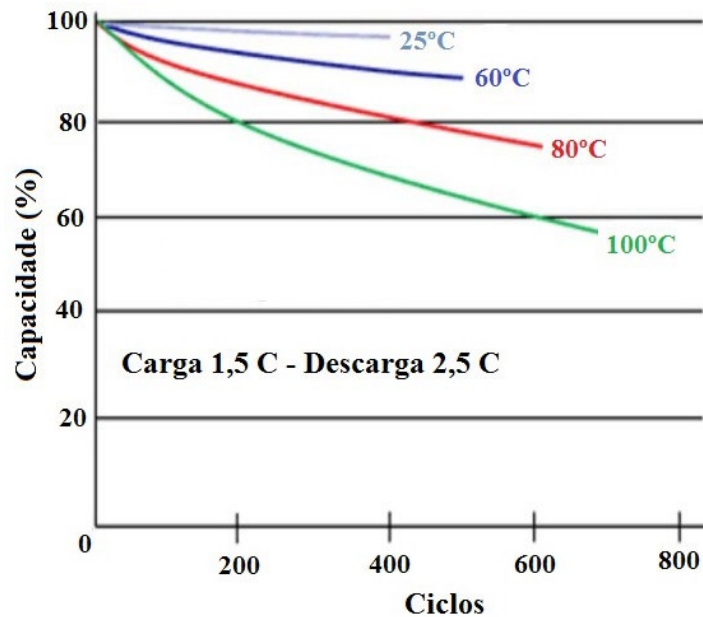


Figura 46 – Perda de capacidade da bateria x temperatura

As baterias de lítio-íon são sensíveis à temperatura, pois afetam a vida, o desempenho (capacidade e resistência), a segurança e eventualmente o custo. As temperaturas mais altas degradam as baterias de lítio-íon mais rapidamente (figuras 46 e 47).

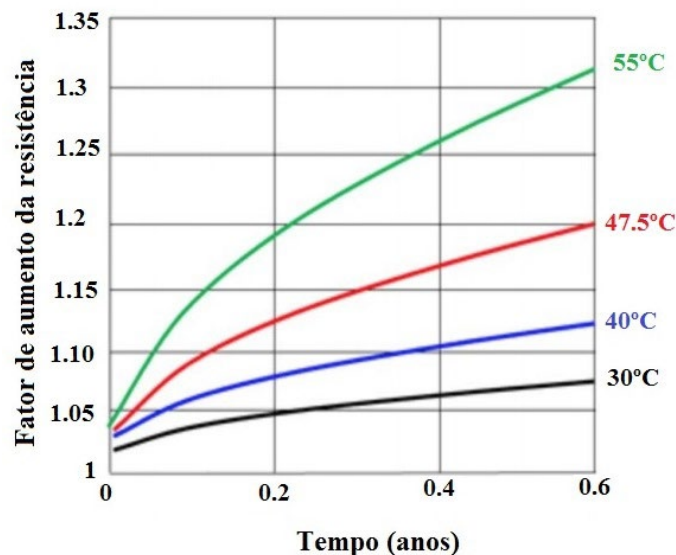


Figura 47 – Aumento da resistência interna x temperatura

As baixas temperaturas reduzem os recursos de energia. O controle adequado da temperatura melhora a confiabilidade, a segurança e a capacidade. O

gerenciamento térmico da bateria é necessário em packs com muitas células como nos carros elétricos.

Manter as células na faixa de temperatura desejada, minimizar as variações de temperatura de célula a célula, impedir que a bateria fique acima ou abaixo dos limites aceitáveis, maximizar energia útil das células e do pack de baterias como um todo.

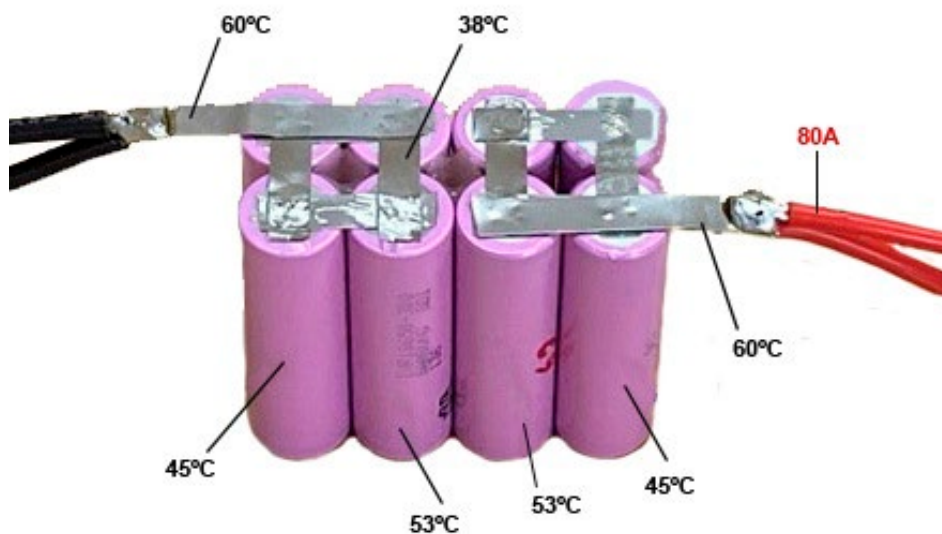
Mapear as temperaturas dentro do pack de baterias ajuda a entender o comportamento térmico, cria diagnósticos e aprimora os projetos. O perfil térmico dentro do pack de baterias de vários fatores:

- **Geometria**
- **Condutividade térmica do gabinete e núcleo**
- **Localização dos terminais**
- **Projeto das interconexões**
- **Densidade de corrente**
- **Perfil de corrente**
- **Temperatura ambiente**

A figura 48 mostra o mapeamento de temperatura num pack de 7,4V sendo descarregado com 80A.

Deve-se notar que as células têm temperaturas diferentes dependendo da sua posição no pack. As conexões também têm temperaturas diferentes dependendo da corrente.

As conexões mais quentes são aquelas que suportam maior corrente, ou seja, nos terminais de saída por onde circula a maior corrente.



**Figura 48 – Mapeamento de temperatura em pack**

## 5.4 Comunicação e Integração Industrial (CAN Bus, RS485 e Bluetooth)

No ecossistema da Indústria 4.0, um pack de baterias isolado é um ponto cego operacional. A comunicação e integração transforma o acumulador de energia em um dispositivo inteligente, permitindo a manutenção preditiva e o controle dinâmico de carga.

Para que uma planta industrial ou um veículo elétrico opere com eficiência, o BMS deve transmitir dados em tempo real para um controlador mestre (CLP, inversor ou ECU).

### A. CAN Bus (Controller Area Network): O Padrão de Robustez

É o protocolo mais utilizado em mobilidade elétrica e automação pesada (ISO 11898).

- Vantagens: Alta imunidade a ruídos eletromagnéticos (comum em fábricas com motores grandes) e capacidade de priorização de mensagens.
- Dados Transmitidos: Tensão total, corrente, SoC (%), SoH (%), temperatura do ponto mais quente e códigos de erro (DTC).
- Integração: Permite que o BMS "peça" ao carregador para reduzir a corrente se uma célula estiver aquecendo, sem intervenção humana.

### B. RS485 / Modbus RTU: O Padrão para Sistemas Estacionários

Muito utilizado em bancos de baterias para energia solar e Data Centers.

- Vantagens: Permite a conexão de múltiplos packs em paralelo (endereçamento escravo) comunicando-se com um único gateway ou CLP.
- Distância: Suporta cabos de comunicação de até 1200 metros, ideal para grandes galpões de armazenamento de energia.

### C. Monitoramento Wireless (Bluetooth/Wi-Fi)

Embora menos robusto para controle crítico, é essencial para o comissionamento e diagnóstico rápido.

- Uso Técnico: Permite que o técnico de manutenção verifique o equilíbrio das células e o histórico de alarmes através de um smartphone ou tablet, sem precisar abrir o gabinete metálico da bateria.

### Dicionário de Dados Críticos para o CLP/Inversor

Para uma integração bem-sucedida, o programador do sistema deve mapear os seguintes registros do BMS:

1. CCL (Charge Current Limit): O BMS informa ao carregador qual a corrente máxima permitida naquele instante (ex: reduz para 0A se o pack estiver cheio).

2. DCL (Discharge Current Limit): O BMS informa ao inversor quanto de carga ele pode puxar (ex: reduz a potência se a bateria estiver no fim para evitar desligamento brusco).
3. Alarmes de Warning vs. Fault:
  - *Warning*: Alerta de alta temperatura (o sistema reduz a carga).
  - *Fault*: Erro crítico (o sistema abre o contator de segurança).

### Hardware de Conexão: Isolamento Galvânico

Em sistemas de alta tensão (acima de 60V), é obrigatório que as portas de comunicação (CAN/RS485) possuam isolamento galvânico. Isso evita que uma falha de alta tensão no pack destrua o CLP ou coloque o operador em risco através dos cabos de dados.

## 5.5 MOSFETs vs. Contatores Industriais

No design industrial, é necessário definir como o BMS interrompe fisicamente o fluxo de energia. Em sistemas de alta potência, essa não é uma decisão apenas de custo, mas de capacidade de interrupção e robustez térmica. Enquanto dispositivos eletrônicos de consumo utilizam transistores (MOSFETs) para controle, sistemas industriais de alta tensão ou corrente massiva exigem chaves eletromecânicas (Contatores).

### A. Chaveamento por MOSFETs (Estado Sólido)

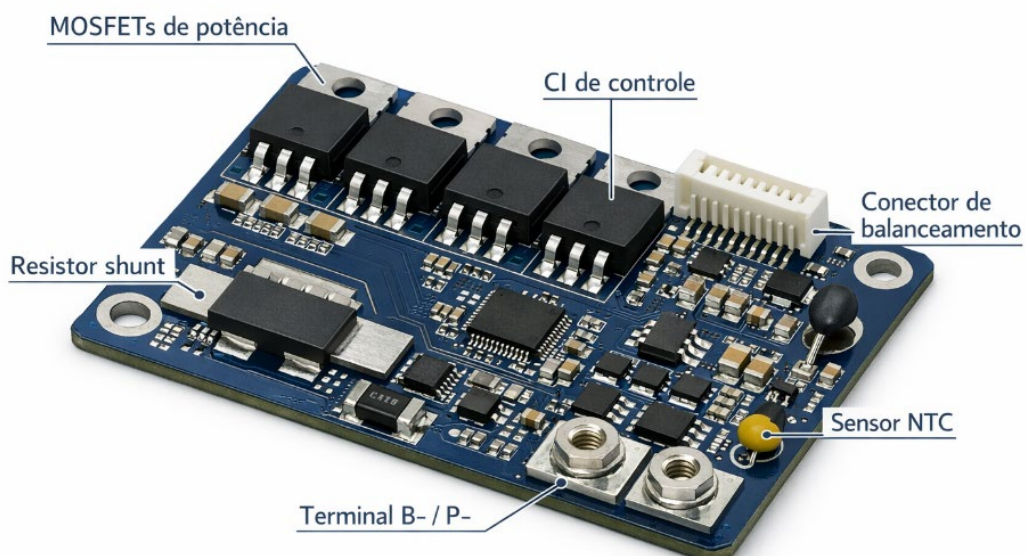


Figura 49 – Placa BMS com transistores MOSFET

Utilizado em sistemas de baixa a média potência (geralmente até 48V – 150A), o MOSFET (acrônimo de *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) é um transistor de efeito de campo eletrônico usado para chavear (funcionar como interruptor) e amplificar sinais elétricos

- Funcionamento: O BMS utiliza uma matriz de transistores em paralelo para permitir ou bloquear a passagem de elétrons.
- Vantagens: Chaveamento ultrarrápido (microsegundos), sem partes móveis (imune a vibração), silencioso e baixo consumo de energia no controle.
- Desvantagens: Geram calor devido à resistência interna, exigindo dissipadores de alumínio. Em caso de falha catastrófica, o MOSFET tende a entrar em curto-circuito (fechado), o que é um risco de segurança.

### B. Chaveamento por Contatores (Eletromecânico)

O padrão para Sistemas de Alta Tensão (HV) e Correntes de Pico Elevadas (>200A).

- Funcionamento: Um relé de alta robustez isola fisicamente os terminais do pack.
- Vantagens: Isolamento galvânico real (ar entre os contatos); suporta surtos de corrente imensos sem queimar; falha tipicamente em modo "aberto" (seguro).
- Desvantagens: Lentos (milissegundos), consomem energia para manter a bobina atracada e sofrem desgaste por arco elétrico.

### Tabela de Decisão Técnica

Parâmetro	MOSFETs	Contactores
Tensão do sistema	< 60 V	> 60 V a 1000 V+
Corrente contínua	Até 150–200 A	200 A a 1000 A+
Gestão térmica	Crítica	Baixa
Segurança (fail-safe)	Risco de curto	Seguro
Pré-carga	Geralmente integrada	Obrigatória externa

**Dica de Engenharia:** Posicionamento dos Sensores de Corrente

Ao usar contadores, o sensor de corrente (Shunt) deve ser posicionado de forma que o BMS consiga ler a corrente de carga e descarga mesmo durante a fase de pré-carga, garantindo que não haja um curto-circuito antes de fechar a chave principal.

## 5.6 Especificação de placas PCM

As especificações das placas BMS normalmente apresentam um esquema eletrônico do circuito da placa (figura 50), um esquema de ligações (figura 49) e uma tabela com as principais características.

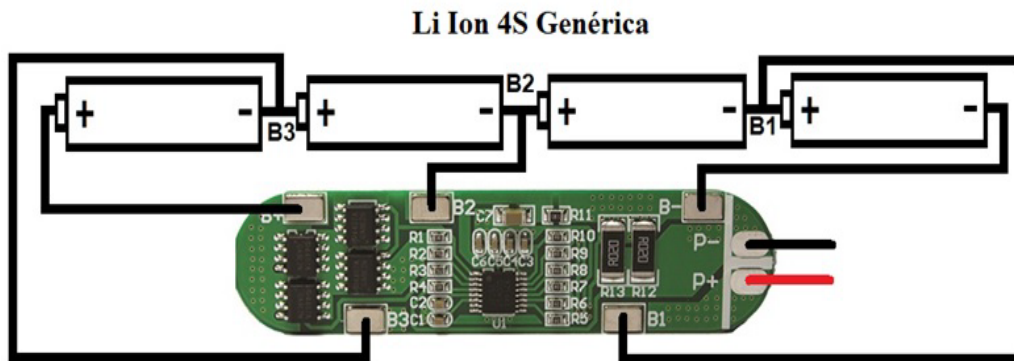


Figura 49 – Placa BMS – esquema de ligação

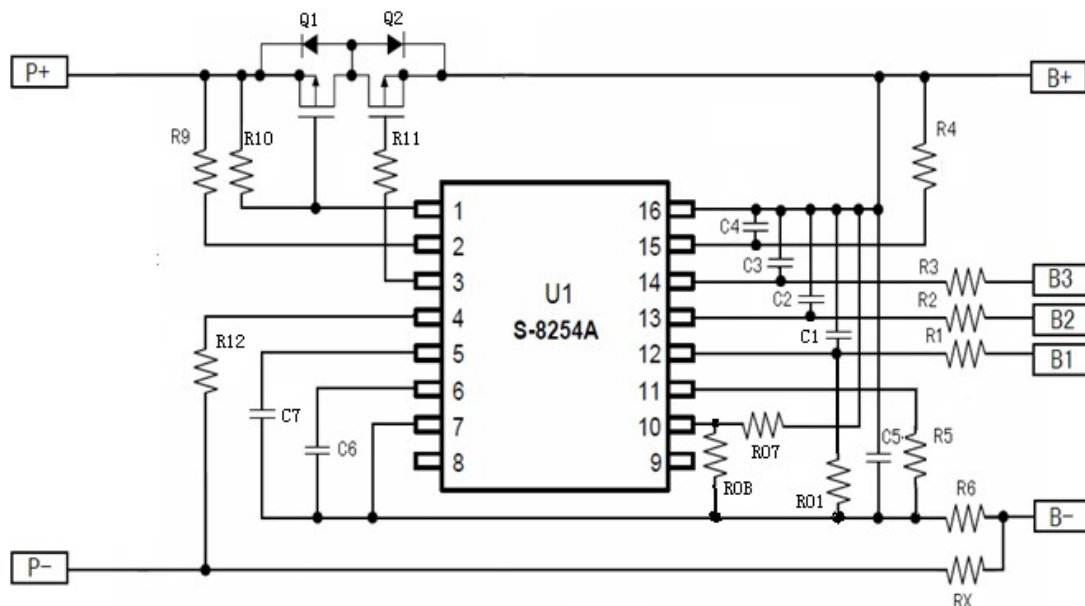


Figura 50 – Circuito eletrônico de placa BMS

Uma especificação básica de uma placa BMS deve conter pelo menos os parâmetros listados na tabela a seguir.

Item	Conteúdo	Critério
<b>Voltagem</b>	Tensão de carregamento	4.275V ± 0.025V
<b>Corrente</b>	Carga	2A
	Descarga	2A
	Pico de descarga	5A
<b>Proteção contra sobrecarga</b>	Voltagem de detecção de carga	4,35 ± 0,025V
	Tempo de atraso de detecção de	0.5 ~ 2S
	Tensão de liberação de sobrecarga	4.15 ± 0.025V
<b>Proteção contra descarga excessiva</b>	Voltagem de detecção de descarga excessiva	2.40 ± 0.05V
	Tempo de atraso de detecção de descarga excessiva	50 ~ 200mS
	Tensão de término de descarga	3.00V ± 0.1V
<b>Proteção contra curto</b>	Condição de detecção	Curto-circuito exterior
	Condição de liberação	Corta a carga
<b>Dimensão</b>		26,01x3,65x1,75 mm

**Tabela - Placa BMS para 1 célula – especificações**

## Capítulo 6: Dimensionamento dos Fios, Conexões e Barramentos

O dimensionamento dos cabos de saída de um pack de baterias é uma etapa crítica no desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia. Esta escolha impacta diretamente a eficiência, a segurança e a vida útil de todo o sistema elétrico. Condutores subdimensionados geram quedas de tensão excessivas e superaquecimento por efeito Joule. Esse cenário pode causar a degradação precoce das células e riscos severos de incêndio.

Por outro lado, o superdimensionamento impõe penalidades de custo, peso e volume. Essas desvantagens comprometem a viabilidade econômica e a densidade energética do projeto. O engenheiro deve equilibrar variáveis elétricas, térmicas e mecânicas para encontrar a seção transversal ideal do cobre ou alumínio.

Este capítulo apresenta os critérios fundamentais para o cálculo e a seleção desses condutores:

- **Capacidade de condução de corrente:** Limites térmicos dos materiais em regime contínuo e de pico.
- **Queda de tensão máxima permitida:** Impacto na eficiência de transferência de potência da bateria para a carga.
- **Condições de dissipação térmica:** Influência do ambiente, do agrupamento de cabos e do tipo de isolamento.
- **Normas técnicas de segurança:** Diretrizes regulatórias vigentes para garantir a conformidade do projeto.

### 6.1 Dimensionamento dos fios de saída

Para dimensionar os fios de um pack de baterias de lítio-íon, a bitola (espessura) correta depende da **corrente de descarga** (amperagem) e do **comprimento do cabo** para evitar quedas de tensão.

Abaixo está uma tabela de referência baseadas nos padrões AWG (comumente usados em fios de silicone para modelismo e eletrônica) e milímetros quadrados ( $\text{mm}^2$ ).

#### Tabela de Corrente por Bitola (AWG e $\text{mm}^2$ )

Esta tabela foca em correntes contínuas típicas para aplicações de curta distância (dentro do próprio pack ou até o BMS):

A tabela abaixo mostra a capacidade de condução de corrente e a resistência elétrica de condutores de cobre flexíveis (padrão comum em fios de silicone).

Os fios de silicone são conhecidos por sua alta flexibilidade e excelente isolamento térmico, frequentemente especificados pelo padrão americano AWG (American Wire Gauge).

Bitola (AWG)	Seção Aproximada (mm <sup>2</sup> )	Resistência Máx. a 20°C (Ω/km)	Corrente Máx. Recomendada (A)
30 AWG	0,05	354,0	0,8 A
28 AWG	0,08	223,0	1,5 A
26 AWG	0,14	140,0	2,2 A
24 AWG	0,22	88,9	3,5 A
22 AWG	0,34	55,8	5,0 A
20 AWG	0,50	35,2	7,5 A
18 AWG	0,75	23,2	10,0 A
16 AWG	1,30	13,4	15,0 A
14 AWG	2,08	8,4	20,0 A
12 AWG	3,30	5,3	30,0 A
10 AWG	5,20	3,3	40,0 A
8 AWG	8,30	2,1	55,0 A
6 AWG	13,30	1,3	80,0 A

Observações importantes:

- Temperatura: A corrente informada assume condições de bom resfriamento. Como fios de silicone suportam temperaturas muito elevadas, geralmente de 150°C a 200°C, eles frequentemente operam em densidades de corrente superiores aos cabos de PVC comuns para curtas distâncias.
- Queda de Tensão: Se o fio for longo (geralmente acima de 2 a 3 metros), a resistência do cobre fará a tensão cair no final do circuito, exigindo um cabo mais grosso.
- Essa tabela é apenas um exemplo. Para aplicações práticas é necessário consultar a tabela do fio que está sendo utilizado.

Um dos aspectos mais importantes do projeto e construção de um pack de baterias, é determinar a bitola dos fios de saída.

Para calcular a bitola dos fios, deve-se levar em consideração dois fatores principais:

- A corrente máxima suportada pelo fio;
- A queda de tensão provocada pelo fio.

A corrente é calculada pela equação:

$$I = P / V$$

Onde I é a corrente em Ampères, P é a potência em Watts e V é a tensão em volts.

Por exemplo, se conectarmos uma lâmpada de 60 Watts, num pack de baterias de 12 Volts, a corrente é calculada, dividindo 60 watts por 12 volts:

$$I = P / V = 60 \text{ W} / 12 \text{ V} = 5 \text{ A}$$

Por segurança, recomenda-se utilizar um fio com capacidade adicional de corrente. Conforme a tabela acima, um fio 20 AWG com capa de silicone, que suporta até 7,5A ampères, seria adequado. Os fabricantes disponibilizam tabelas de corrente para os fios. É importante consultar a tabela específica do fabricante do fio que será utilizado, para checar se realmente o fio escolhido suporta a corrente necessária.

Todos os elementos de um circuito elétrico têm resistência, incluindo os fios. Isso significa que os fios provocam uma queda de tensão no pack de baterias. Geralmente, a queda de tensão aceitável para circuitos de corrente contínua, é de cerca de 3%. A queda de tensão nos fios é calculada usando-se a Lei de Ohm:

$$V = R \times I$$

Onde V é a queda de tensão em Volts, R é a resistência do fio em ohms e I é a corrente em Ampères.

Um fio de 20 AWG, com 2 metros de comprimento, tem uma resistência de 0,0704Ω. Como o pack de baterias tem 2 fios, a resistência total dos fios, é de 0,1408Ω.

A queda de tensão nos fios é:

$$V = R \times I = 0,1408 \Omega \times 5 \text{ A} = 0,704 \text{ V}, \text{ ou } 5,8\% \text{ da tensão do pack de 12 volts}$$

Embora o cabo de 20 AWG esteja correto para a corrente de 5 ampères, não deve ser usado, pois a queda de tensão é maior que 3%. Se usarmos fios de 16 AWG, a queda de tensão é:

$$V = R \times I = 0,0536 \Omega \times 5 \text{ A}, \text{ o que dá } 0,268 \text{ V ou } 2,2\% \text{ da tensão de 12 volts do pack.}$$

Portanto o fio 16 AWG é adequado para suportar a corrente necessária, com uma queda de tensão inferior a 3%.

Em resumo, os fios devem suportar a corrente do equipamento alimentado pelo pack de baterias, com uma queda de tensão menor que 3%.

### Considerações Importantes

- **Tipo de Fio:** Recomenda-se fortemente o uso de **fio de silicone com núcleo de cobre estanhado**. Eles são extremamente flexíveis e suportam altas temperaturas (até 200°C), o que é vital caso as baterias ou conexões aqueçam.
- **Margem de Segurança:** Sempre utilize uma bitola com capacidade cerca de **25% superior** à corrente máxima que seu motor ou inversor irá exigir para evitar perdas de energia por calor.
- **Queda de Tensão:** Em cabos longos (acima de 1 metro), a resistência do fio faz a voltagem "cair". Se o cabo for longo, suba um ou dois níveis na bitola (ex: de 12 AWG para 10 AWG).
- **Conectores:** Use conectores compatíveis com a bitola e corrente, como a linha XT30 (30A), XT60 (60A) ou XT90 (90A).  
A resistência do fio é um fator crítico para evitar a queda de tensão ( $V = R \cdot I$ ) e o aquecimento excessivo do pack. Em baterias de lítio, fios de silicone com núcleo de cobre estanhado são o padrão devido à flexibilidade e resistência térmica.

#### Como usar esses dados no seu projeto:

1. **Cálculo da Queda de Tensão:** Multiplique a resistência pelo comprimento total do cabo (ida e volta) e pela corrente. Exemplo: 2 metros (total) de fio **10 AWG** a **40A** gera uma queda de  $2\text{m} \times 3,3\text{ m}\Omega/\text{m} \times 40\text{ A} = 0,264\text{ V}$
2. **Limite de Perda:** Em sistemas de Corrente Contínua (DC), tente manter a queda de tensão abaixo de **3%** do valor total da bateria para garantir eficiência.
3. **Resistência Interna:** Lembre-se que o pack também possui uma resistência interna própria (células e barramentos de níquel que deve ser acrescida no cálculo da queda de tensão).

## 6.2 Dimensionamento dos fios de balanceamento

Os fios de balanceamento conectam cada série de células do pack ao Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS). Diferente dos cabos de potência, esses condutores operam com correntes baixas. Sua função principal é monitorar as tensões individuais e corrigir desequilíbrios de carga entre as células.

O dimensionamento correto desses fios evita leituras incorretas de tensão provocadas por quedas internas de potencial. Condutores muito finos ou longos introduzem resistência parasita. Essa resistência distorce os dados enviados ao BMS e compromete a precisão do balanceamento. Além disso, esses cabos devem suportar picos de corrente durante falhas e resistir a vibrações mecânicas sem romper.

Esta seção aborda os parâmetros essenciais para a escolha e o cálculo desses condutores:

- **Corrente de balanceamento:** Demanda nominal do circuito passivo ou ativo do BMS (geralmente de 50 mA a alguns Amperes).
- **Precisão de leitura de tensão:** Minimização da queda de tensão para garantir medições exatas do BMS.
- **Resistência mecânica mínima:** Seleção da bitola (AWG/mm<sup>2</sup>) baseada na robustez necessária contra vibração e fadiga.
- **Proteção contra curto-circuito:** Uso de fusíveis de linha ou dimensionamento para fusão segura do fio em caso de falha interna.

### 6.2.1 Dimensionamento dos Condutores de Balanceamento Passivo

Os fios de balanceamento conectam cada série de células ao Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) para monitoramento e equalização. No método **passivo**, o BMS dissipa o excesso de energia das células mais carregadas na forma de calor através de resistores internos. Como esse processo envolve correntes baixas (geralmente entre 50 mA e 300 mA), os condutores operam sob demandas elétricas reduzidas se comparados aos cabos de potência.

Apesar da baixa corrente, o dimensionamento correto é vital para a precisão do sistema. Fios com resistência interna elevada geram quedas de tensão que mascaram o real estado de carga das células durante a dissipação. Isso faz com que o BMS faça leituras incorretas, prejudicando a eficiência da equalização e reduzindo a vida útil do pack.

Esta seção detalha os critérios para o cálculo e seleção desses condutores no cenário passivo:

- **Corrente de dissipação:** Adequação à baixa corrente nominal do circuito de queima do BMS.
- **Mitigação de erro de leitura:** Controle da resistência do fio para eliminar quedas de tensão parasitas.
- **Robustez mecânica:** Escolha da bitola mínima (geralmente entre 22 AWG e 26 AWG) para resistir a esforços físicos.
- **Suporte térmico do isolamento:** Resistência ao calor gerado pelos resistores de dissipação próximos ao conector do BMS.

### 6.2.2 Dimensionamento dos Condutores de Balanceamento Ativo

Os condutores de balanceamento conectam cada nó em série de células do pack ao Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) para fins de monitoramento e equalização. No método **ativo**, o sistema não dissipa a energia sobressalente em forma de calor. Em vez disso, ele redistribui dinamicamente a carga das células com maior potencial para as células com menor potencial, utilizando circuitos baseados em capacitores comutados, indutores ou conversores CC-CC isolated.

Devido a essa transferência real de energia, o balanceamento ativo opera com correntes significativamente maiores do que o método passivo — variando tipicamente de **1 A a 10 A** ou mais. Essa magnitude elevada de corrente transforma o dimensionamento dos fios em um desafio de potência e térmica, e não apenas de sensoriamento de sinal.

Esta seção detalha os parâmetros críticos para o cálculo e a seleção desses condutores no cenário ativo:

- **Capacidade de condução de corrente:** Dimensionamento da seção transversal do fio para suportar as correntes de transferência contínuas ou pulsadas sem superaquecimento.
- **Minimização da queda de tensão dinâmica:** Redução da resistência do condutor para evitar perdas por efeito Joule, o que comprometeria a eficiência de conversão energética do BMS ativo.
- **Erro de leitura transiente:** Controle do impacto das altas correntes pulsadas na leitura de tensão das células, exigindo filtros de hardware ou algoritmos avançados de amostragem no BMS.
- **Gerenciamento físico e de espaço:** Balanceamento entre a necessidade de bitolas maiores (menor resistência) e as severas restrições de peso e espaço físico dentro do invólucro do pack.

Aqui está a demonstração do cálculo do erro de leitura de tensão provocado pela resistência dos fios de balanceamento passivo:

### 6.2.3 O Fenômeno do Erro de Leitura

Durante o processo de balanceamento passivo, a corrente de dissipação flui pelo condutor de balanceamento até o resistor do BMS. De acordo com a Lei de Ohm, essa corrente gera uma queda de tensão ao longo do comprimento do fio devido à sua resistência elétrica interna.

Como o circuito integrado (IC) de monitoramento do BMS utiliza a mesma linha física para medir a tensão da célula e para descarregá-la, o sensor lê a tensão da célula subtraída da queda de tensão no fio:

$$V_{\text{lida}} = V_{\text{célula}} - I_{\text{balanceamento}} \times R_{\text{fio}}$$

Esse desvio induz o BMS a ler uma tensão **menor** do que a real enquanto o balanceamento está ativo.

#### Exemplo Prático de Cálculo

Para ilustrar o impacto desse fenômeno, considera-se o cenário de projeto abaixo:

- **Fio utilizado:** Bitola de **26 AWG** (cobre recozido comum em chicotes de BMS).
- **Comprimento do fio (L):** 0,5 metros.
- **Corrente de balanceamento passivo (I bal):** 200 mA (0,2 A).

#### Passo 1: Determinar a resistência do fio (R fio)

A resistência de um condutor de cobre de 26 AWG a 20 °C é de aproximadamente 140 Ω/km ou 0,140 Ω/m.

$$R_{\text{fio}} = 0,140 \text{ } \Omega/\text{m} \times 0,5 \text{ m} = 0,07 \text{ } \Omega$$

#### Passo 2: Calcular a queda de tensão (V queda)

Aplica-se a Lei de Ohm para encontrar o erro gerado pela corrente de balanceamento:

$$V_{\text{queda}} = I_{\text{bal}} \times R_{\text{fio}} = 0,2 \text{ A} \times 0,07 \text{ } \Omega = 0,014 \text{ V} = 14 \text{ mV}$$

## Conclusão do Exemplo

Neste cenário, o BMS registrará uma tensão **14 mV abaixo** do valor real da célula durante a descarga.

Dado que os BMS comerciais exigem precisão de leitura na ordem de **1 mV a 5 mV** para gerenciar químicas estáveis como o LiFePO<sub>4</sub> ou Íons de Lítio, um erro de 14 mV impede o funcionamento correto do algoritmo de proteção e equalização.

### 6.2.4 Estratégias de Engenharia para Mitigação

Para anular ou mitigar este erro no projeto, utilizam-se três abordagens principais:

1. **Aumento da Bitola (Redução de R fio):** Substituir o fio de 26 AWG por um de 22 AWG (resistência de 0,0558  $\Omega$  /m, reduzindo o erro para cerca de 5 mV no mesmo comprimento).
2. **Amostragem em Período de Janela (Duty Cycle):** Programar o BMS para interromper temporariamente a corrente de balanceamento por alguns milissegundos antes de realizar a leitura da tensão. Sem corrente circulando, a queda zera, e a leitura torna-se 100% precisa.
3. **Linhas de Sensoriamento Dedicadas:** Utilizar dois fios por nó da célula (um fio grosso para drenar a corrente de balanceamento e um fio fino paralelo que não conduz corrente, usado exclusivamente para medição de alta impedância).

## 6.3 Dimensionamento da fita metálica para conectar as células

O cálculo da fita de níquel para packs de baterias (como 18650 ou 21700) foca na **ampacidade** (capacidade de condução de corrente) para evitar que a resistência do material gere calor excessivo, o que pode degradar as células.

### 6.3.1 Capacidade de Corrente por Dimensão

A capacidade varia drasticamente se a fita for de **Níquel Puro** (recomendado para alta performance) ou **Aço Niquelado** (mais barato, mas com maior resistência e menor capacidade de corrente).

Dimensões (mm)	Níquel Puro (Corrente Máx. Estimada)	Aço Niquelado (Corrente Máx. Estimada)
0,10 x 8,0	~5A a 7A	~2A a 3A
0,15 x 8,0	~7A a 10A	~4A a 5A
0,20 x 8,0	~12A a 15A	~7A a 8A

### 6.3.2 Regra Prática de Dimensionamento

Para um projeto seguro, utilize uma densidade de corrente conservadora de aproximadamente **10A por mm<sup>2</sup>** para níquel puro.

- **Cálculo da Área da Seção Transversal:**
- $\text{Area (mm}^2\text{)} = \text{Espessura (mm)} \times \text{Largura (mm)}$
- **Exemplo:** Uma fita de 0,15mm x 8mm tem uma área de 1,2mm<sup>2</sup>  
 $1,2\text{mm}^2 \times 10 \text{ A /mm}^2 = 12\text{A}$  (limite teórico máximo)

### 6.3.3 Considerações Cruciais para o Pack

- **Conexões em Série vs. Paralelo:** As fitas que ligam os grupos em **série** carregam toda a corrente do pack e devem ser mais robustas (ou duplicadas). As conexões em **paralelo** servem apenas para equilibrar as células e podem ser mais finas.
- **Empilhamento de Fitas:** Colocar uma fita sobre a outra aumenta a seção transversal, mas **não dobra** exatamente a capacidade de corrente, pois a dissipação de calor da fita de baixo fica prejudicada.
- **Comprimento:** Quanto mais longa a fita entre os polos, maior a resistência e a queda de tensão. Mantenha as pontes o mais curtas possível.

### 6.3.4 Como Identificar o Material

Para garantir que não está usando aço niquelado (que oxida e aquece mais), faça o **teste da centelha** com uma retífica ou lixa: o aço solta faíscas brilhantes, enquanto o níquel puro quase não produz faíscas.

## 6.4 Dimensionamento dos barramentos de cobre

A capacidade de condução de corrente em barramentos de cobre retangulares depende da sua seção transversal e das condições de dissipação térmica. Abaixo, apresentamos uma tabela orientativa baseada em dados técnicos comuns de mercado para barras de cobre nuas em temperatura ambiente de 35°C.

**Tabela de Capacidade de Corrente (Cobre Nu)**

Bitola (Pol.)	Dimensões (mm)	Área mm <sup>2</sup>	Corrente Estimada (A)
1/2" x 1/8"	12,70 x 3,17	39,0	97 A
3/4" x 1/8"	19,05 x 3,17	58,6	146 A
1" x 1/8"	25,40 x 3,17	78,1	195 A
1" x 3/16"	25,40 x 4,76	117,2	281 A
1" x 1/4"	25,40 x 6,35	156,2	359 A
2" x 1/4"	50,80 x 6,35	312,5	656 A
4" x 1/2"	101,60 x 12,70	1250,0	2625 A

### **Observações Importantes para Dimensionamento**

- **Pintura:** Barramentos pintados com tinta fosca podem ter uma capacidade de corrente até **15% a 20% maior** devido à melhor dissipação de calor por radiação.
- **Posicionamento:** As capacidades acima geralmente consideram barras na vertical. Barras na horizontal dissipam menos calor.
- **Temperatura:** Os valores podem variar conforme a elevação de temperatura permitida (ex: 30°C ou 50°C acima do ambiente).
- **Fontes de Consulta:** Para projetos industriais rigorosos, utilize tabelas de fabricantes.

## Capítulo 7: Acessórios de Proteção

A maioria dos packs de baterias inclui algum tipo de proteção. Os principais tipos de proteção de baterias são:

- Polyswitch
- NTC
- Termostatos
- Fusíveis
- Diodos
- Fusíveis térmicos

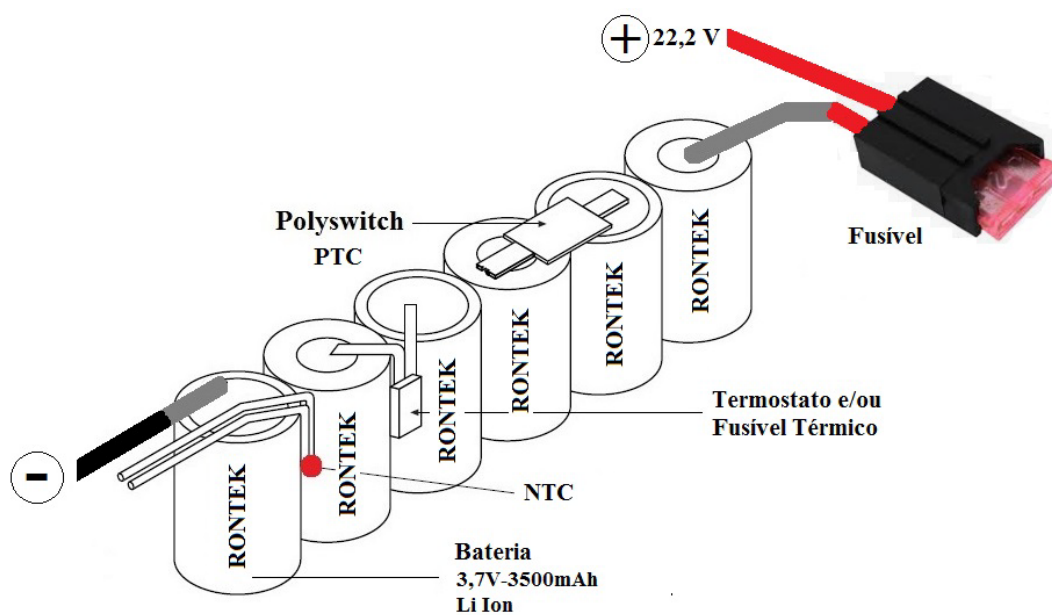


Figura 51 - Componentes de proteção de pack de baterias

As células de alta potência de lítio íon podem ser perigosas, pois contêm grandes quantidades de energia que, se liberadas de maneira descontrolada por um curto-circuito ou dano físico, podem ter consequências catastróficas.

No caso de curtos-circuitos, correntes de centenas de ampères podem circular em microssegundos e os circuitos de proteção devem agir com muita rapidez para evitar isso.

Diferentes aplicações e diferentes tipos de baterias requerem diferentes graus de proteção. As baterias de lítio, em particular, precisam de circuitos especiais de proteção e controle para mantê-las dentro dos limites operacionais especificados para tensão, corrente e temperatura.

Além disso, as consequências da falha de uma célula de lítio podem ser bastante graves, possivelmente resultando em uma explosão ou incêndio. A proteção das células é, portanto, indispensável nas baterias de lítio.

A proteção de baterias deve abordar os seguintes eventos ou condições indesejáveis:

- **Corrente excessiva durante o carregamento ou descarregamento.**
- **Curto-circuito**
- **Sobre tensão**
- **Subtensão**
- **Superaquecimento**
- **Acúmulo de pressão dentro da célula**
- **Isolamento do sistema em caso de acidente**
- **Abuso**

É aconselhável que se use pelo menos dois dispositivos de proteção. Se um falhar, o outro está lá como uma rede de segurança.

Para baterias de lítio-íon é comum se usar uma placa BMS em conjunto ou com um termostato ou com um polyswitch (PTC) ou com um NTC.

Além das proteções externas à bateria, existem as proteções nas próprias células que são a última linha de defesa se todas as outras medidas de proteção falharem.

O processo eletroquímico dentro da bateria pode dar origem à geração de gases, principalmente durante condições de sobrecarga. Se a pressão dentro da célula aumentar, a célula poderá romper ou explodir. Para superar esse problema, as células seladas normalmente incorporam alguma forma de ventilação para liberar a pressão de maneira controlada, se ela se tornar excessiva.

Células de lítio-íon cilíndricas normalmente tem válvula de alívio de pressão que permite o alívio da pressão interna da bateria evitando assim risco de incêndio e explosão.

Já as células de lítio-íon polímero comuns não têm válvulas de alívio de pressão excessiva e por isso incham quando gás é produzido em seu interior, podendo até mesmo explodir em caso de falhas de todas as outras proteções.

## 7.1 Proteção de packs de baterias com poliswitch – PTC

O polyswitch se assemelha a um fusível reutilizável. Em condições normais a resistência do polyswitch é baixa. Quando a corrente que circula pela bateria é excessiva, o polyswitch cria uma resistência alta, inibindo o fluxo de corrente.

É também conhecido como PTC (Positive Temperature Coefficient), ou seja, sua resistência aumenta com o aumento da temperatura provocado pela corrente excessiva na bateria.

Quando a condição se normaliza, a resistência do PTC reverte para baixo, permitindo retomar a operação normal. Não requer rearme manual e, portanto, é muito conveniente para o usuário que pode nem estar ciente de sua operação. O fusível é acionado quando uma temperatura específica é atingida.

O aumento da temperatura pode ser causado pelo auto aquecimento resistivo do termistor devido à corrente que passa por ele ou por condução ou convecção do ambiente. Assim, pode ser usado para proteger contra sobre corrente e superaquecimento. O PTC dispara a uma corrente mais baixa se a temperatura ambiente for mais alta. Os detalhes ambientais e elétricos da aplicação devem ser totalmente compreendidos ao projetar uma proteção de fusível reinicializável. Esses dispositivos são facilmente integrados ao design da bateria, soldando os terminais da célula ou colocando-os na placa de circuito.



Figura 52 – PTC

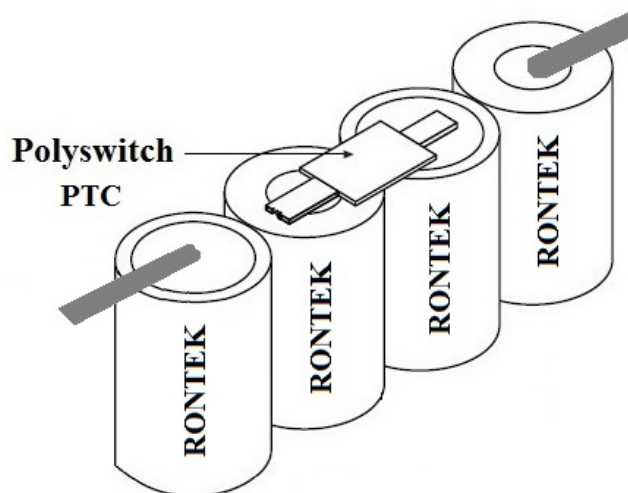


Figura 53 – Ligação do PTC em série com as células

Na figura 54 mostramos a influência da temperatura na corrente de abertura do PTC. Quanto mais alta é a temperatura, menor é a corrente de abertura do PTC.

Quanto menor a temperatura, maior é a corrente de abertura PTC.

Na figura 55 observamos as curvas do tempo de abertura do PTC em função da corrente. As curvas A,B,C, etc, são as curvas para diferentes modelos de PTC. Por exemplo para o PTC modelo A, se a corrente for de 20 A o tempo de abertura é 0,01s. Se a corrente for menor, por exemplo 10A, o tempo de abertura será maior, ou será 0,06s.

Deve-se notar que na corrente nominal, o PTC não abre nunca.

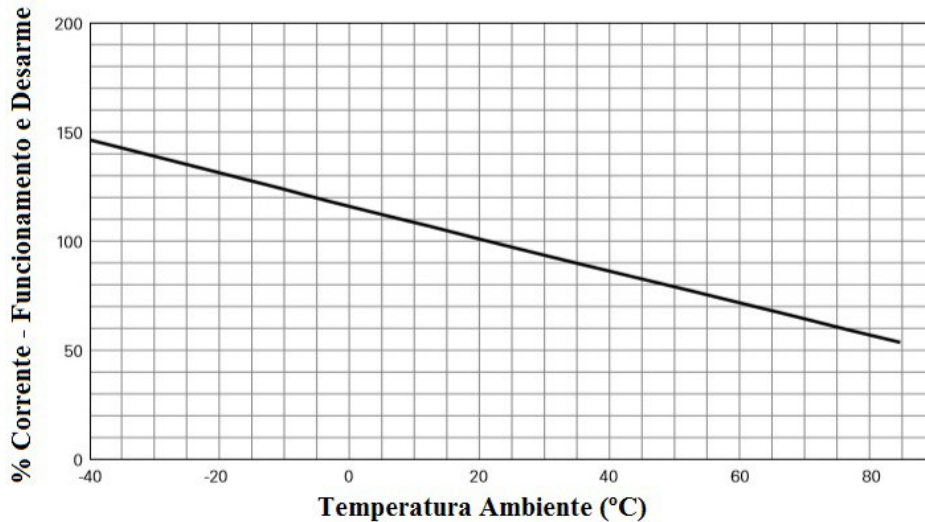


Figura 54 – Influência da temperatura ambiente no PTC

Por exemplo um PTC de 2A (figura 55 – curva G) num pack de baterias que consome 2A não irá abrir nunca. Porém este mesmo PTC, caso ocorra um curto-circuito e a corrente suba para 30A, irá se abrir em pouco menos de 0,1s.

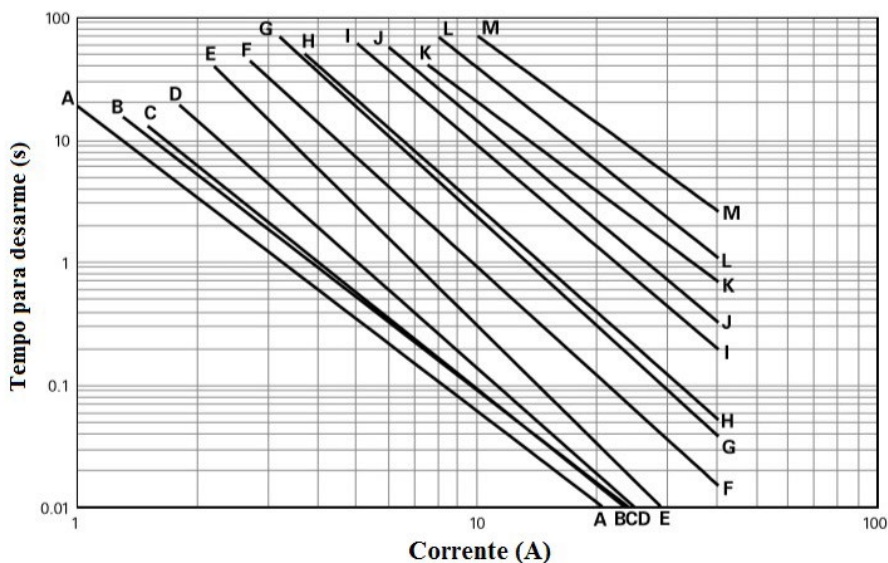


Figura 55 – Curvas de corrente do PTC

## 7.2 Proteção de packs de baterias com NTC ou termistores

Termistores são dispositivos de circuito cuja resistência varia com a temperatura. Os termistores PTC possuem um coeficiente de temperatura positiva, pois sua resistência aumenta gradualmente com a temperatura e, em uma faixa limitada, a resistência pode ser considerada linearmente proporcional à temperatura. Da mesma forma, os termistores NTC têm um coeficiente de temperatura negativo e sua resistência diminui à medida que a temperatura aumenta. Esses componentes são amplamente utilizados em circuitos de monitoramento e proteção de packs de baterias.



Figura 56 – NTC 10 K $\Omega$

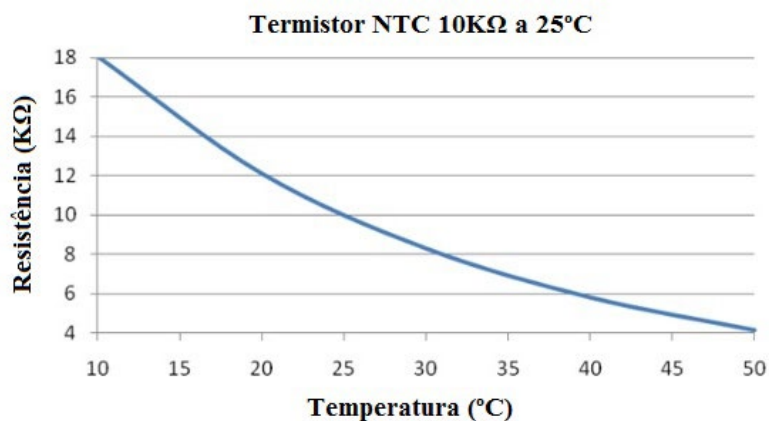


Figura 57 – NTC – Curva de Resistência

Quando se detecta uma variação para baixo nessa resistência do NTC, o circuito entende que a temperatura está alta demais e providencia a interrupção da corrente na bateria.

Normalmente é fixado na parte externa de uma das células. Um circuito eletrônico monitora a resistência do termistor.

Para proteção de packs de baterias normalmente se usam termistores do tipo NTC de 10 K $\Omega$  ou 100 K $\Omega$ .

Os packs de baterias que tem NTC de proteção, normalmente tem 3 ou 4 fios de saída, como mostrado na figura 58.

Quando o pack de baterias tem 3 fios (figura 58A), um fio é o positivo, o outro fio é o negativo e o terceiro fio é um dos terminais do NTC. O outro terminal do NTC neste caso é ligado ao negativo do pack de baterias.

Quando o pack de baterias tem 4 fios (figura 58B), um fio é o positivo, o outro fio é o negativo e os outros dois fios são os terminais do NTC.

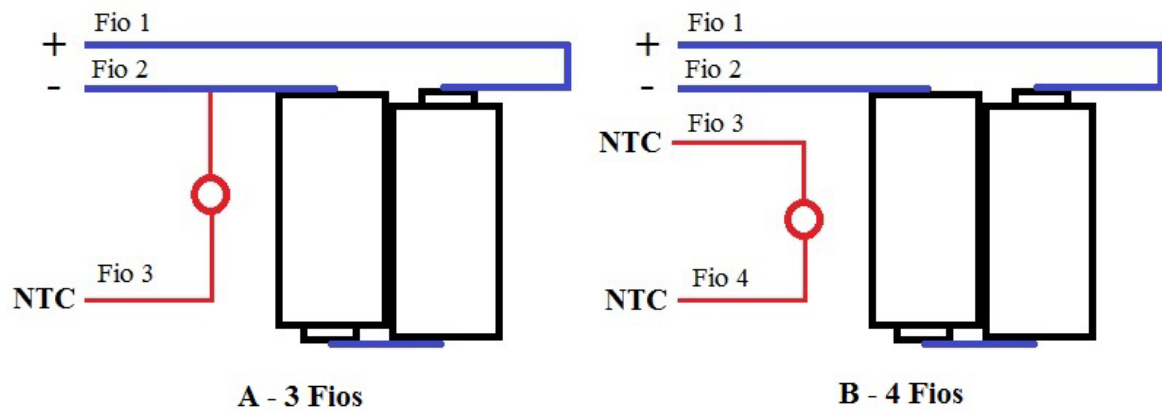


Figura 58 – Esquema de ligação do NTC

### 7.3 Proteção de packs de baterias com termostatos

Protetores térmicos também são utilizados para interromper a corrente em caso de temperatura excessiva.

Um dos protetores térmicos mais utilizados é o termostato, que desconecta a carga da bateria, quando a temperatura ultrapassa determinado valor.

Quando a condição se normaliza, o termostato volta a ligar a carga na bateria.

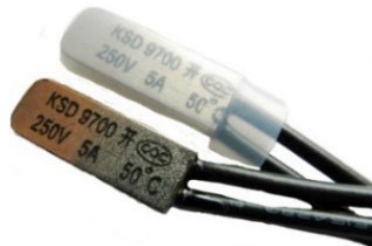


Figura 59 – Termostato usado em packs de baterias

O termostato possui em seu interior um contato que abre ou fecha conforme a temperatura.

O contato do termostato mostrado na figura 59 abre com uma temperatura de  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  e volta a fechar com  $35^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

O contato é ligado em série com a bateria e pode interromper até 5A (figura 60 A).

Caso a corrente do pack de baterias seja superior a 5A, se deve usar o termostato para acionar um contator de maior corrente e este por sua vez irá interromper o circuito da bateria (figura 60 B).

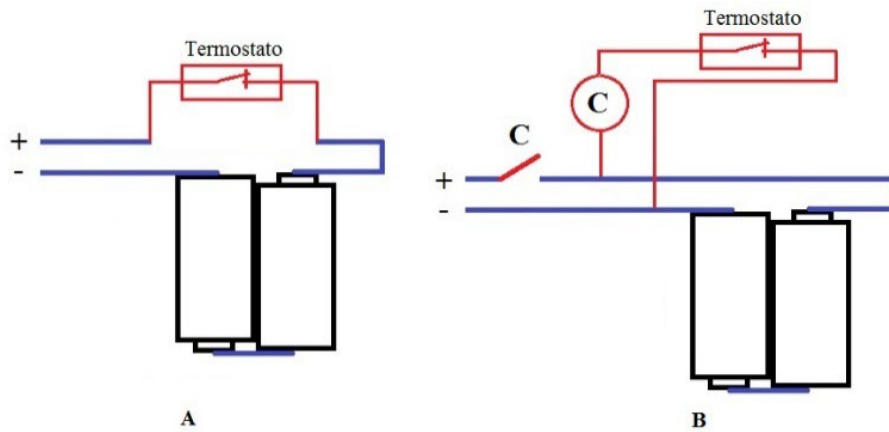


Figura 60 – Termostato usado em packs de baterias

#### 7.4 Proteção de packs de baterias com fusíveis

A proteção mais básica de packs de baterias é um fusível que se abre no caso de uma corrente excessiva, especialmente curto-circuito.

Os fusíveis se abrem permanentemente e tornam a bateria inútil.



Figura 61 – Fusível usado em packs de baterias

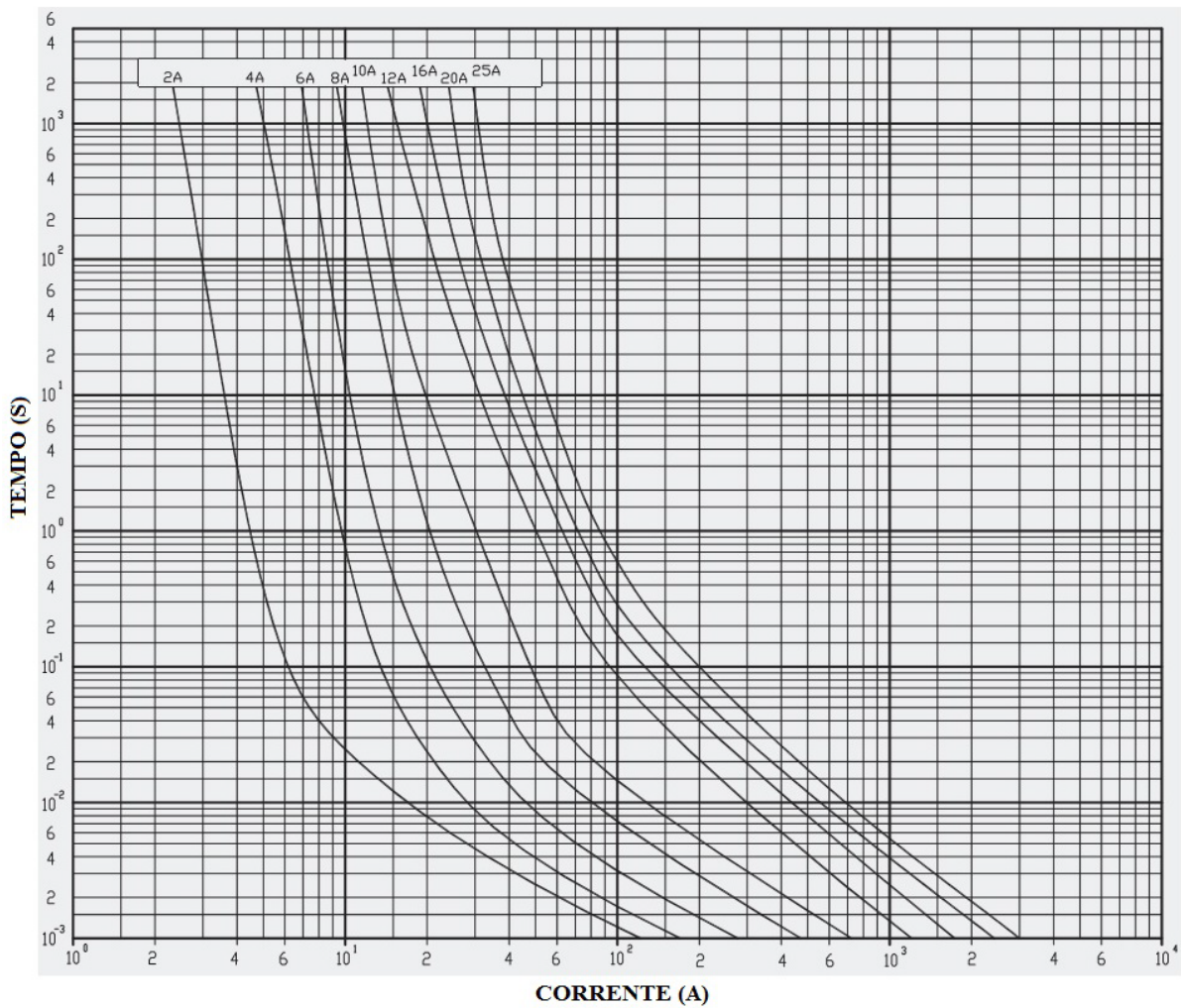
Fusíveis convencionais também podem ser usados para proteger a bateria contra sobrecarga, mas em muitas situações, principalmente quando a sobrecarga não é muito grande, eles podem não agir com rapidez suficiente.

As curvas da figura 62 mostram o tempo de abertura do fusível em função da corrente.

Para correntes baixas o fusível não abre ou demora muito para abrir. Conforme a corrente aumenta, mais rapidamente o fusível irá se abrir. Deve-se notar que na corrente nominal, o fusível não abre nunca.

Por exemplo, um fusível de 2 A num pack de baterias que consome 2 A não irá abrir nunca.

Porém este mesmo fusível, caso ocorra um curto-circuito e a corrente suba para 100 A, irá se abrir em pouco mais de 1 ms.

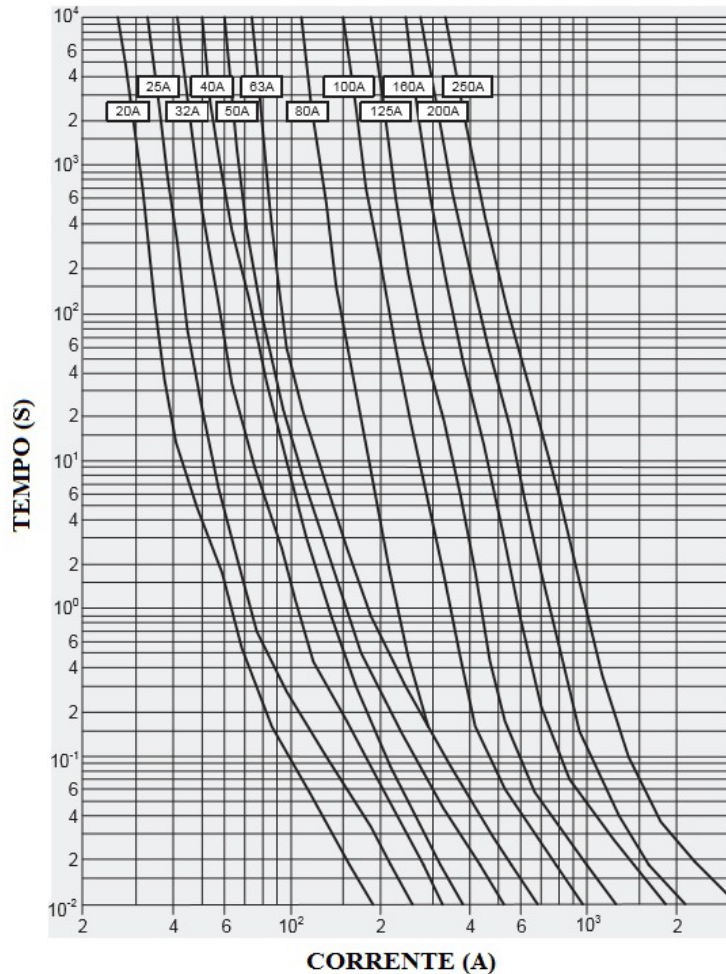


**Figura 62 – Fusíveis de 2A a 25 A**

Para packs maiores, que consomem corrente maiores, se pode utilizar fusíveis do tipo NH. A figura 64 mostra as curvas de corrente do fusível NH.



**Figura 63 – Fusível NH**



**Figura 64 – Curvas de corrente para fusível NH**

Na escolha do fusível deve-se considerar a corrente de pico do pack de baterias. O fusível tem que ser escolhido de forma que nunca abra nesta corrente. Também deve-se estimar uma possível corrente de curto-circuito do pack. O valor dessa corrente pode ser estimado usando a lei de Ohm:

$$I = V/R$$

Onde I é a corrente em A, V é a tensão do pack e R é a soma da resistência interna das baterias do pack mais a resistência dos fios de saída do pack. Por exemplo, consideremos um pack de baterias para bicicleta elétrica. Este pack tem 36V e é montado com 40 células de 2600 mAh, 40 mΩ de resistência interna e corrente de pico de 5,2 A. A configuração de montagem do pack é 10S4P - 10 conjuntos de células em série e cada conjunto desses com 4 células em paralelo. Nessas condições a resistência interna do pack seria:

$$\text{Cada conjunto de 4 células em paralelo: } 40 \text{ m}\Omega / 4 = 10 \text{ m}\Omega$$

10 conjuntos de 4 células em paralelo:  $10 \text{ m}\Omega \times 10 = 100 \text{ m}\Omega = 0,1 \Omega$

A corrente de pico do pack é:  $5,2 \text{ A}$  (uma célula)  $\times 4$  (células em paralelo) =  $20,8 \text{ A}$ . Se considerarmos os fios de saída de bitola de  $4 \text{ mm}^2$ , cuja resistência é de  $4,6 \Omega/\text{km}$ , com comprimento de  $1 \text{ m}$  (ou  $0,001 \text{ km}$ ), temos a seguinte resistência:

$$2 \text{ fios de saída} \times 0,001 \text{ km} \times 4,6 \Omega/\text{km} = 0,0092 \Omega$$

Assim a corrente de curto-circuito seria:

$$I = V/R = 36 / (0,1 + 0,0092) = 329 \text{ A}$$

Se usarmos o tipo de fusível mostrado na figura 61, podemos escolher aquele com corrente nominal imediatamente acima da corrente de pico do pack, que é de  $20,8 \text{ A}$ . O modelo escolhido seria o de  $25 \text{ A}$ . Consultando as curvas da figura 62, verificamos que com uma corrente de curto-circuito de  $329 \text{ A}$ , esse fusível abre em  $50 \text{ ms}$ .

## 7.5 Proteção de packs de baterias com fusistores

O **fusistor** (também conhecido como resistor fusível) é um componente eletrônico híbrido que desempenha uma **dupla função: atua como resistor limitador de corrente e como fusível de proteção**.

Ele é projetado para operar normalmente controlando o fluxo elétrico, mas se abre permanentemente (rompendo o circuito) caso ocorra uma sobrecarga severa, evitando incêndios ou danos a componentes mais caros.

### Como Funciona

- **Operação Normal:** O componente se comporta como um resistor comum, geralmente apresentando **baixa resistência (menor que 100 ohms)** e baixa potência de dissipação. Ele limita picos iniciais de energia (*inrush current*).
- **Dissipação de Pequenos Picos:** Quando há uma leve elevação na corrente, ele converte o excesso de energia em calor por efeito Joule e volta a esfriar assim que o circuito se normaliza.
- **Ação de Fusível (Sobrecarga):** Se a corrente ultrapassar o limite máximo suportado por muito tempo ou ocorrer um curto-circuito, o fusistor aquece ao extremo e **se funde ("queima")**, abrindo o circuito de forma segura e sem gerar chamas.

## Tipos de Fusistores

1. **Fusistor de Filme ou Fio (Modernos):** São construídos com materiais antichama. O próprio filamento interno se rompe quando atinge uma temperatura crítica decorrente da sobrecorrente. São soldados diretamente na placa de circuito impresso (PCI).

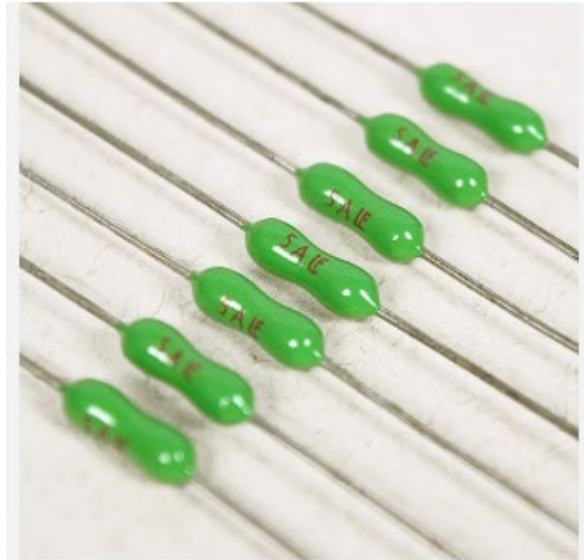


Figura 65 – Fusistor de filme

A principal diferença é que o fusível apenas protege o circuito contra sobrecorrentes, enquanto o fusistor protege e limita a corrente em funcionamento normal.

Aqui está a comparação direta entre os dois componentes:

### **Fusível**

- Função única: Serve exclusivamente como um dispositivo de segurança de sacrifício.
- Resistência elétrica: Quase zero (desprezível). Não interfere no fluxo de energia em estado normal.
- Comportamento: Permite a passagem livre da corrente até atingir o limite estipulado (ex: 2A). Acima disso, ele queima instantaneamente.
- Uso comum: Na entrada de energia de aparelhos, caixas de distribuição e carros.

### **Fusistor (Resistor Fusível)**

- Dupla função: Atua como um resistor limitador de corrente no dia a dia e como fusível em caso de falha.

- Resistência elétrica: Possui um valor ôhmico definido e deliberado (geralmente baixo, como 1Ω, 4.7Ω ou 10Ω)
- Comportamento: Controla ativamente a corrente (como picos de inicialização) gerando uma pequena queda de tensão. Se houver um curto-circuito, ele queima e abre o circuito.
- Uso comum: Em circuitos internos delicados, como fontes chaveadas de carregadores e placas de eletrodomésticos.

### Resumo das Diferenças

Característica	Fusível	Fusistor
Objetivo Principal	Cortar a energia em falhas	Limitar corrente + Cortar energia
Resistência (Ω)	Próxima de zero	Valor fixo e calculado
Queda de Tensão	Não provoca	Provoca uma pequena queda
Material Comum	Fio de estanho/chumbo em vidro	Filme de carbono ou fio com capa antichama
Substituição	Pode usar outro fusível de mesma corrente	Nunca substitua por fusível comum ou resistor comum

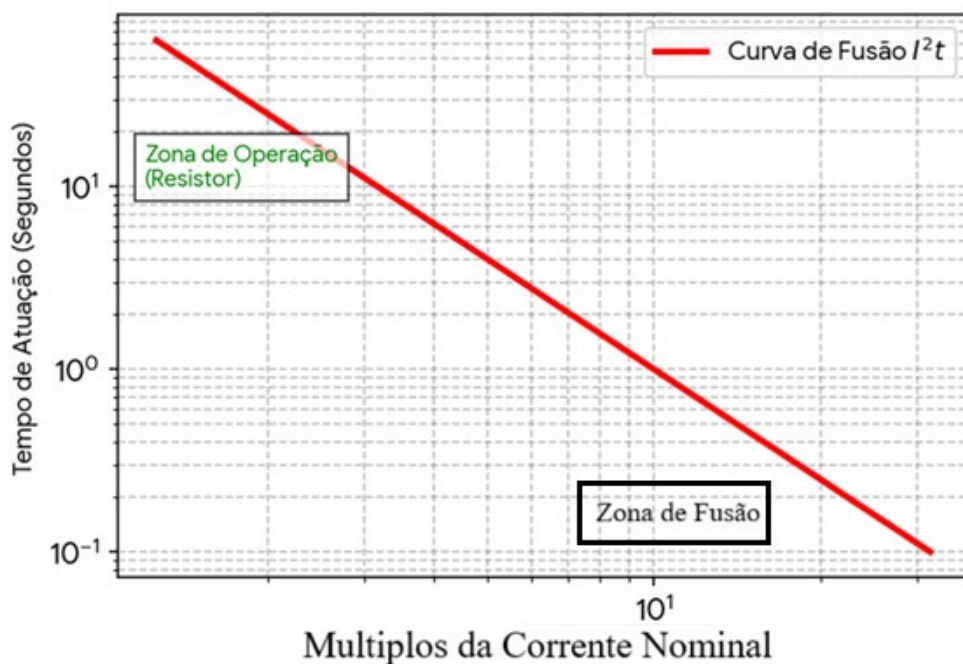


Figura 66 – Curva típica de um fusistor

## 7.6 Proteção de packs de baterias com fusíveis térmicos (TCO)

Pode-se usar também um fusível térmico ou TCO (Thermal Cut-Off), que desliga a bateria permanentemente em caso de temperatura excessiva.

### Os Dois Tipos Principais de Funcionamento

O mecanismo interno varia de acordo com o modelo do fusível térmico:

#### 1. Tipo Liga Fusível (Película de Cera / Resina)

É o modelo mais comum em eletrodomésticos (parece um pequeno cilindro de metal com uma ponta colorida).

- **Por dentro:** Ele possui um pino de contato elétrico pressionado por uma mola forte contra uma pastilha de composto químico (resina ou cera especial).
- **Em uso normal:** A pastilha é sólida e segura a mola, mantendo o contato fechado e a energia passando.
- **No superaquecimento:** Quando a temperatura atinge o limite do fusível, a pastilha derrete instantaneamente. A mola é liberada, empurra o contato para longe e **abre o circuito**.

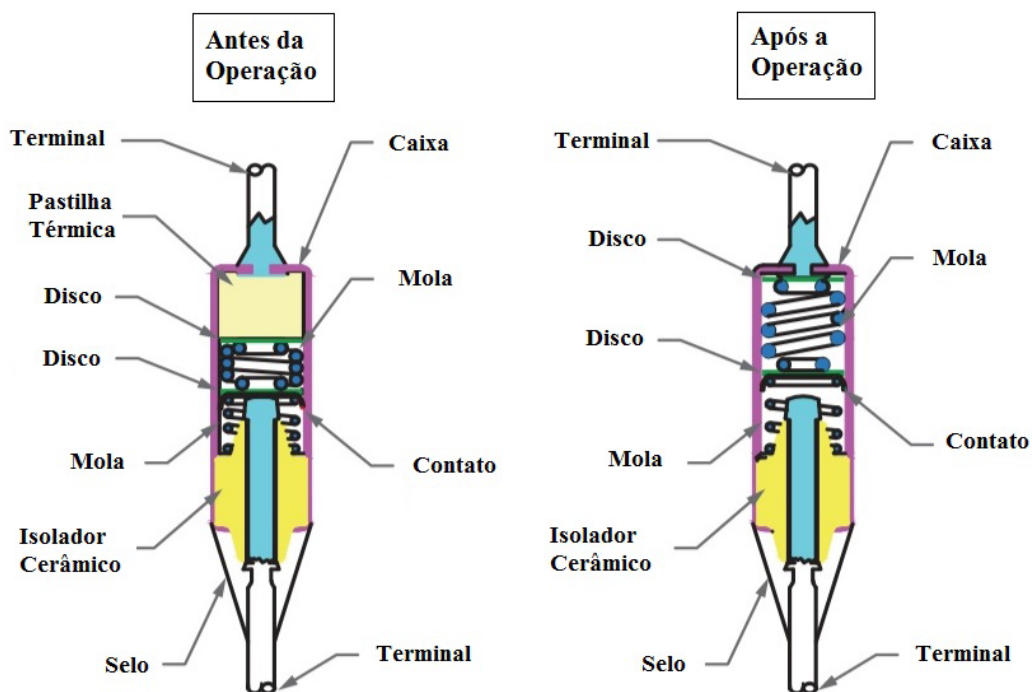


Figura 67 – Fusível térmico – forma construtiva

## 2. Tipo Fio Fusível (Liga Metálica)

Comum em modelos que parecem um pequeno resistor retangular de cerâmica ou plástico.

- **Por dentro:** Possui um elemento condutor feito de uma liga metálica especial com ponto de fusão controlado.
- **No superaquecimento:** O calor derrete diretamente esse fio interno. Pela ação da gravidade e da tensão superficial do metal derretido, as pontas se separam e a corrente elétrica é interrompida.

### Por que ele não pode ser reaproveitado?

A mudança física dentro do TCO é **irreversível**. A cera derreteu ou o fio se partiu, destruindo a estrutura interna do componente para salvar o seu aparelho (e sua casa) de um incêndio.



Figura 68 – Fusível térmico

Os fusíveis térmicos possuem os seguintes parâmetros:

Tf – Temperatura em que o fusível abre  $\pm 5^{\circ}\text{C}$

Th – Temperatura máxima na caixa do fusível, na qual ele pode ser mantido por pelo menos 168 horas sem abrir.

Tm – Temperatura máxima suportada pelo fusível.

Ir – Corrente que o fusível consegue interromper

Ur – Tensão máxima que o fusível consegue interromper a corrente Ir.

Como exemplo, um fusível térmico usado comumente na proteção de packs de baterias tem os seguintes parâmetros:

Tf –  $73^{\circ}\text{C}$

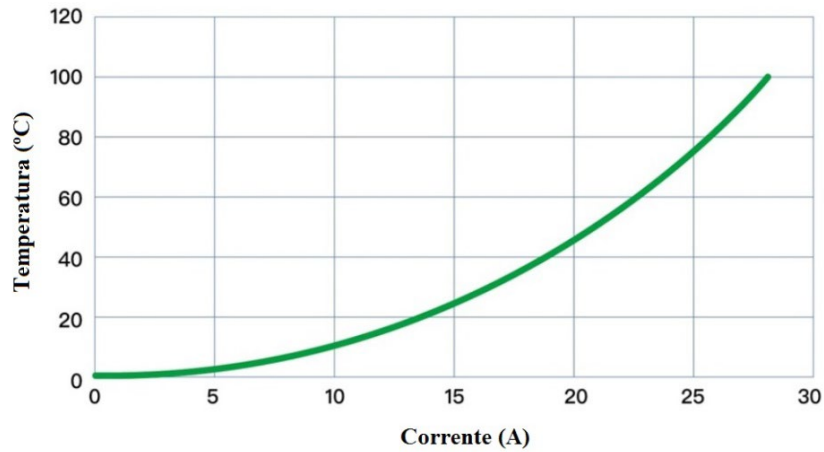
Th –  $58^{\circ}\text{C}$

Tm –  $175^{\circ}\text{C}$

Ir – 10 A

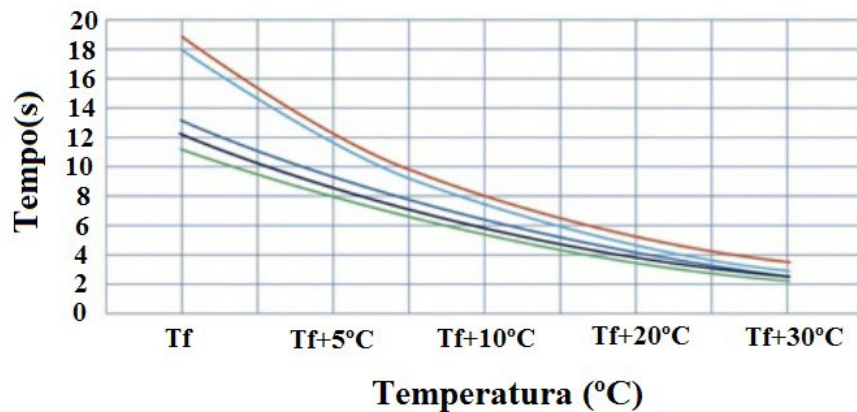
Ur – 250 V

A figura 69 mostra a influência da corrente que passa pelo fusível em seu aquecimento. Sendo assim o fusível é acionado pela temperatura provocada pela passagem de corrente nele mais a temperatura da própria bateria.



**Figura 69 – Influência da corrente no aquecimento do fusível térmico**

A figura 70 mostra os tempos de abertura do fusível térmico em função da temperatura. Quanto maior a temperatura mais rapidamente fusível térmico abre. Como fusível térmico desliga a bateria permanentemente, deve ser projetado para só abrir em condições extremas de temperatura da bateria.



**Figura 70 – Tempos de atuação do fusível térmico em função da temperatura**

## Capítulo 8: Construção e Montagem

A construção de um pack de baterias robusto e seguro exige mais do que simplesmente conectar células em série e paralelo. Este capítulo aborda as etapas práticas, materiais essenciais e as regras de engenharia necessárias para montar um banco de baterias de alta performance, minimizando riscos de falhas elétricas e térmicas.

### 8.1 O Elemento Base: Seleção de Células

A qualidade do pack depende da uniformidade das células utilizadas (geralmente nos formatos cilíndricos 18650 ou 21700).

A física por trás de um pack de baterias determina que o conjunto sempre terá o desempenho limitado pela sua pior célula.

Se uma única célula apresentar degradação prematura, todo o pack perderá capacidade, desbalanceará constantemente e correrá riscos térmicos.

Portanto, o processo de triagem inicial (conhecido como *cell matching*) é a etapa mais crítica da engenharia de montagem.

- **Casamento de Células (Cell Matching):** Todas as células de um pack devem ser do mesmo fabricante, modelo e lote. Elas precisam ter a mesma capacidade nominal (mAh) e, crucialmente, a mesma **Resistência Interna (IR)**. Diferenças de resistência geram desbalanceamento precoce e aquecimento desigual.

#### 8.1.1 Análise de Resistência Interna (IR)

A resistência interna é a oposição ao fluxo de corrente dentro da célula, medida em miliohms ( $m\Omega$ ).

- **O Impacto:** Células com maior IR geram mais calor sob carga e sofrem maior queda de tensão.
- **Como Medir:** Nunca use um multímetro comum na função de ohmímetro. Utilize um testador de IR por Corrente Alternada (geralmente na frequência padrão de 1kHz).
- **Critério de Seleção:** Para células novas de alta qualidade (como Samsung, Sony ou LG), a variação máxima permitida entre todas as células do pack deve ser de **apenas  $\pm 2 m\Omega$** .

Para criar um processo de triagem eficiente, você deve cruzar os dados medidos no seu analisador com as folhas de dados oficiais (datasheets) dos fabricantes. Abaixo

estão as tabelas práticas divididas por categoria de aplicação para o formato mais comum no mercado, o 18650.

As medições de Resistência Interna (IR) abaixo consideram o componente novo, testado sob o método padrão de Corrente Alternada (AC) a 1kHz.

### **Células de Alta Corrente (Ferramentas e Veículos)**

Indicadas para aplicações que exigem grande descarga de corrente imediata (furadeiras, aspiradores sem fio, patinetes elétricos). Elas priorizam **baixa resistência interna** para evitar sobreaquecimento sob estresse.

<b>Modelo da Célula</b>	<b>Capacidade Nominal</b>	<b>Descarga Contínua Máxima</b>	<b>IR Nominal de Fábrica (Novo)</b>	<b>Limite de Descarte para o Pack</b>
Molicel P28A	2800 mAh	35 A	20mΩ	Acima de 24mΩ
Sony/Murata VTC6	3000 mAh	30 A (com corte térmico)	15mΩ	Acima de 19 mΩ
Samsung 30Q	3000 mAh	15 A	18mΩ	Acima de 22 mΩ
Sony/Murata VTC5A	2600 mAh	35 A	12mΩ	Acima de 16mΩ

### **Células de Média Corrente e Uso Geral**

O melhor equilíbrio entre custo, capacidade e capacidade de descarga. São as células mais utilizadas em baterias de bicicletas elétricas, caixas de som portáteis de grande porte e notebooks.

<b>Modelo da Célula</b>	<b>Capacidade Nominal</b>	<b>Descarga Contínua Máxima</b>	<b>IR Nominal de Fábrica (Novo)</b>	<b>Limite de Descarte para o Pack</b>
Samsung 35E	3500 mAh	8 A	35mΩ	Acima de 40mΩ
Sanyo/Panasonic GA	3500 mAh	10 A	38mΩ	Acima de 45mΩ
LG MJ1	3500 mAh	10 A	40mΩ	Acima 45mΩ
Samsung 29E	2900 mAh	8 A	35mΩ	Acima de 42mΩ

## Células de Alta Capacidade e Baixa Corrente (Lanternas e Powerbanks)

Ideais para armazenar o máximo de energia possível em circuitos que consomem pouca corrente. **Não devem ser usadas em ferramentas elétricas**, pois vão superaquecer devido à alta resistência interna intrínseca ao projeto químico delas.

Modelo da Célula	Capacidade Nominal	Descarga Contínua Máxima	IR Nominal de Fábrica (Novo)	Limite de Descarte para o Pack
Panasonic NCR18650B	3350 mAh	4.8 A	40mΩ	Acima de 60mΩ
LG F1L	3350 mAh	4.8 A	50mΩ	Acima de 65mΩ

### Como aplicar estes dados na bancada?

1. **Defina a sua tolerância de montagem:** Para montar o bloco em paralelo, agrupe células cuja variação de capacidade seja menor que **50mAh** entre si.
2. **Identifique células falsificadas:** Se você comprou uma *Sony VTC6* (que deveria registrar cerca de 13mΩ a 15mΩ e seu aparelho de teste indicar 45mΩ, a célula é falsificada ou está severamente desgastada. Ela irá superaquecer se for submetida a correntes altas.
3. **Monitore a temperatura de recarga:** Durante a triagem no carregador inteligente, se qualquer célula atingir **mais de 45°C** recebendo uma carga padrão de 1C, descarte-a imediatamente. Isso indica uma fuga térmica interna iminente.

### 8.1.2 Homogeneidade de Capacidade Real

A capacidade nominal impressa no rótulo por exemplo 3000mAh é apenas uma referência de fábrica. Na prática, cada lote apresenta pequenas variações.

- **O Processo de Ciclo:** Na situação ideal, as células que serão usadas devem passar por um analisador de baterias para sofrer uma carga completa, seguida de uma descarga controlada a uma taxa padrão (geralmente 0.2C ou 0.5C) até a tensão de corte (2.5V ou 2.8V).
- **Critério de Seleção:** reagrupe as células de modo que a diferença de capacidade real entre elas não ultrapasse **1% a 2%**. Em um pack de 3000mAh, a variação máxima permitida entre a maior e a menor célula deve ser de 30mAh a 60mAh.

- **Situação prática:** Na prática muitas vezes não é possível medir a capacidade de todas as células do pack. Neste caso a sugestão é medir a capacidade de algumas células e usar células do mesmo lote de fabricação.

### 8.1.3 Agrupamento Inteligente

Quando montamos um pack em uma configuração mS nP (onde **m** é o número de células em série para dar voltagem, e **n** é o número em paralelo para dar capacidade), o equilíbrio dos blocos em paralelo é o segredo da longevidade.

- **A Regra de Ouro:** A soma das capacidades de todas as células que compõem o "Bloco Paralelo 1" deve ser rigorosamente igual à soma do "Bloco Paralelo 2", e assim por diante.
- **Método de Distribuição:** Se você tem células de 2950 mAh e 3050 mAh, não coloque todas as de 2950 mAh em uma série e as de 3050 mAh em outra. Distribua-as de forma cruzada (zigzague) para que a média final de cada bloco paralelo seja idêntica.

### 8.1.4 Inspeção de Autodescarga (Self-Discharge Test)

Células com micros curtos internos ou defeitos de fabricação perdem carga sozinhas mesmo sem estarem conectadas a nada.

- **O Teste de Prateleira:** Após ciclar e carregar todas as células até a tensão de armazenamento (geralmente 3.7V a 3.8V), armazene-as em um ambiente controlado por um período de **14 a 30 dias**.
- **A Triagem:** Meça a voltagem de todas após esse período. Aquelas que apresentarem uma queda maior do que 0.05V em relação ao dia do armazenamento devem ser sumariamente descartadas do projeto. Elas atuam como "vampiros elétricos" dentro do pack, descarregando as células vizinhas.

### 8.1.5 Inspeção de Voltagem

Antes da montagem, meça a tensão de cada célula. Elas devem estar com valores idênticos com variação máxima tolerada de 0,05V. Se uma célula apresentar voltagem muito abaixo das outras, descarte-a.

## 8.2 Estrutura Mecânica: Suportes e Isolamento

Numa situação ideal, células de lítio nunca deveriam ser coladas diretamente umas nas outras. O estresse mecânico e a falta de dissipação térmica reduzem drasticamente a vida útil do sistema.

Porém em packs de baterias onde o aquecimento não é considerável e onde o nível de vibração é pequeno ou nulo pode-se colar as células entre si.

A integridade mecânica é o escudo físico que impede um pack de baterias de entrar em curto-circuito devido a vibrações, quedas ou expansão térmica natural das células. No Lítio-Íon, a carcaça metálica cilíndrica de cada célula representa o polo negativo (catodo) em quase toda a sua extensão, o que torna o isolamento estrutural uma questão crítica de segurança.

### 8.2.1 Suportes Plásticos (Cell Holders / Spacers)

A utilização de berços plásticos intertraváveis é aconselhável. Em packs de alta corrente onde há aquecimento significativo das células a utilização de espaçadores é obrigatória. Eles garantem o espaçamento físico padrão entre as células, oferecem isolamento elétrico e criam canais de ventilação para o fluxo de ar. O uso de suportes plásticos intertraváveis (geralmente feitos de plástico ABS ou Policarbonato antichama) é o padrão industrial excelente para uma montagem profissional.



Figura 71 – Espaçador

- **A Função do Espaçamento:** Os suportes garantem uma folga física de **1mm a 2mm** entre as paredes das células. Esse espaço é vital por dois motivos:
  - **Ventilação Passiva/Ativa:** Permite que o ar circule e dissipe o calor gerado no centro do pack.
  - **Prevenção de Atrito:** Sem o suporte, a vibração faz com que o invólucro plástico original da célula (o *shrink wrap* de fábrica) seja roçado até rasgar. Se o metal de duas células adjacentes se tocar sem o isolante, ocorre um curto-circuito direto.
- **Facilidade de Manutenção:** O suporte mantém o bloco rígido, aliviando o estresse mecânico sobre os pontos de solda e as fitas de níquel.

- **Anéis Isolantes de Papel Cevada (Barley Paper):** O polo positivo das células cilíndricas fica muito próximo do anel externo (que já é o polo negativo). Aplique anéis isolantes adesivos de papel cevada no topo de cada célula antes de soldar para evitar que a fita de níquel cause um curto-circuito na quina do componente.

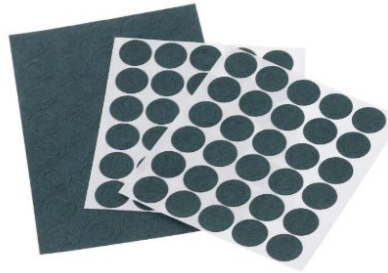


Figura 72 – Papel Isolante

### 8.2.2 O Perigo Oculto no Topo: Papel Cevada (Barley Paper)

O topo de uma célula cilíndrica (como a 18650 ou 21700) é a sua zona mais vulnerável.

- **A Anatomia do Risco:** O "botão" central é o polo positivo (+). A milímetros de distância, separados apenas por um anel isolante de plástico transparente de fábrica, fica a borda superior da carcaça, que é o polo negativo (-).
- **O Erro Comum:** Ao aplicar a fita de níquel para conectar as células, a fita passa por cima dessa quina negativa para atingir o polo positivo da célula ao lado. Sob vibração ou pressão, a fita de níquel pode cortar o plástico original da fábrica e tocar a borda negativa, gerando um curto-circuito de altíssima corrente.
- **A Solução Técnica:** A aplicação de **anéis adesivos de papel cevada (Barley Paper)** ou fita de peixe (*Fish Paper*) sobre o topo de cada célula antes da soldagem. Este material é feito de fibra vulcanizada densa, resistente a altas temperaturas, rasgos e perfurações mecânicas.

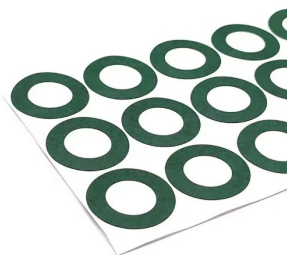


Figura 73 – Anéis Isolante

### 8.2.3 Gerenciamento de Vibração e Fixação Interna

Packs destinados a veículos elétricos (patinetes, bicicletas, skates elétricos) sofrem impactos mecânicos severos e contínuos.

- **Colagem Estrutural:** Embora as células fiquem presas nos suportes plásticos, o bloco de suportes deve ser travado. Utiliza-se **cola de silicone neutra de cura rápida** (específica para eletrônica, que não libera ácido acético) ou cola quente industrial de alta aderência nas junções dos suportes para evitar micro movimentos.
- **Fita Filamentosa (Fita de Fibra de Vidro):** Uma vez montado o bloco com os suportes e soldado o níquel, o pack deve ser cintado transversalmente com fita filamentosa de alta tração. Essa fita impede que o pack se flexione ou torça sob estresse mecânico, protegendo os barramentos de níquel contra trincas por fadiga.



Figura 74 – Anéis Isolante

### 8.2.4 Barreiras de Isolamento Térmico Interno

Em packs complexos, onde a placa BMS fica montada diretamente sobre ou ao lado do bloco de células, barreiras físicas adicionais são indispensáveis.

- **Isolamento da BMS:** Nunca apoie a placa de circuito da BMS direto nas células ou nas fitas de níquel. Utilize uma placa rígida de **fibra de vidro (FR4)** ou uma camada espessa de papel cevada adesivo entre as células e a placa.



Figura 75 – Papel isolante em rolo

- **Caminho dos Fios de Balanceamento:** Os fios finos que saem da BMS para monitorar as séries devem ser organizados em chicotes protegidos por fita Kapton (fita de poliamida resistente ao calor). Evite que esses fios passem por cima de quinas vivas das fitas de níquel, onde o isolamento do fio poderia derreter ou ser cortado.



Figura 76 – Fita Kapton

### 8.3 Conexões Elétricas: A Solda Ponto

**Nunca utilize ferro de solda convencional diretamente nos polos de células de lítio.** O calor prolongado degrada o separador interno de polímero da célula, podendo causar micro curtos internos imediatos ou futuros.

- **Máquina de Solda Ponto (Spot Welder):** Utiliza pulsos de corrente altíssima por milissegundos para fundir os materiais sem aquecer o corpo da célula. Além disso pode-se ajustar a pressão dos eletrodos, para garantir uma soldagem uniforme e bem-feita.



Figura 77 – Máquina de solda ponto

- **DICA:** Fuja das máquinas baratas, sem controle de pressão. Não se consegue uniformidade na soldagem.
- **Fita de Níquel Puro:** É o material padrão para os barramentos. Evite fitas de aço níquelado em packs de alta descarga, pois o aço possui maior resistência elétrica, gerando calor excessivo. Dimensione a espessura da fita (0,15mm-0,20mm) de acordo com a corrente (amperagem) máxima do pack.

A conexão elétrica entre as células é o sistema cardiovascular do pack de baterias. Um erro no dimensionamento do metal condutor ou uma falha na técnica de soldagem resultará em gargalos de corrente, geração excessiva de calor e, no pior cenário, o desprendimento de conexões sob vibração.



Figura 78 – Conexão entre células

### 8.3.1 Por que a Solda Ponto é Obrigatória?

Células de Lítio-Íon utilizam um separador polimérico interno extremamente fino geralmente entre 15  $\mu\text{m}$  e 25  $\mu\text{m}$  para isolar o anodo do catodo.

- **O Risco do Ferro de Solda:** A soldagem tradicional com estanho exige manter a ponta do ferro ( $>350^{\circ}\text{C}$ ) em contato com o polo da célula por vários segundos. Esse calor se propaga para o interior da célula, derretendo o separador plástico e gerando micro curtos internos que destroem a química da bateria ou causam fuga térmica (*thermal runaway*).
- **A Mecânica da Solda Ponto:** A máquina de solda ponto por resistência (*spot welder*) descarrega um pulso elétrico de altíssima corrente (centenas de amperes) através de dois eletrodos de cobre em um intervalo de milissegundos (5ms a 20ms). A resistência elétrica na junção entre a fita de níquel e o topo da célula gera um calor localizado instantâneo, fundindo os dois metais apenas na superfície, sem tempo hábil para o calor se propagar para o interior da estrutura química.

### 8.3.2 O Material Correto: Níquel Puro vs. Aço Niquelado

O mercado oferece dois tipos de fitas para barramento, visualmente idênticos, mas com propriedades elétricas completamente diferentes:

1. **Fita de Níquel Puro (Pure Nickel):** Possui excelente condutividade elétrica e baixa resistência interna. É altamente resistente à corrosão e aceita a fusão da solda ponto com facilidade.



Figura 79 – Fita de níquel puro

2. **Fita de Aço Niquelado (Nickel-Plated Steel):** É uma fita de ferro comum revestida por uma camada microscópica de níquel. O aço possui uma resistência elétrica cerca de **quatro vezes maior** que o níquel puro.
  - *O Impacto:* Usar aço niquelado em packs de média ou alta descarga fará com que as próprias fitas atuem como aquecedores, elevando perigosamente a temperatura do pack.

#### O Teste do Esmeril (Como Identificar Falsificações)

Para garantir que você não está usando aço niquelado vendido como níquel puro:

- Pressione a ponta da fita contra um esmeril ou micro retífica.
- Se soltar **faíscas brilhantes e longas**, é **aço niquelado**.
- Se soltar **pouquíssimas faíscas ou nenhuma**, é **níquel puro**.
- *Teste químico:* Lixe a superfície da fita e mergulhe-a em água com sal por 24 horas. O aço niquelado vai enferrujar agressivamente; o níquel puro permanecerá intacto.

### 8.3.3 Dimensionamento Prático da Fita de Níquel

A espessura e a largura da fita de níquel determinam quanta corrente ela pode conduzir sem aquecer. O dimensionamento deve considerar a corrente máxima exigida pela carga do projeto.

A tabela abaixo serve como guia de engenharia para o uso de **Níquel Puro**:

Espessura da Fita	Largura da Fita	Seção Transversal	Corrente Contínua Segura	Corrente de Pico (Máx. 5s)
0,10 mm	8 mm	0,80 mm <sup>2</sup>	5 A	10 A
0,15 mm	8 mm	1,20 mm <sup>2</sup>	10 A	20 A
0,15 mm	10 mm	1,50 mm <sup>2</sup>	15 A	25 A
0,20 mm	8 mm	1,60 mm <sup>2</sup>	20 A	35 A
0,20 mm	10 mm	2,00 mm <sup>2</sup>	25 A	45 A

*Nota: Se o seu bloco em paralelo precisa descarregar 40A contínuos e você utiliza fita de 0,15mm x 8mm (limite de 10A), você precisará empilhar/sobrepor camadas de fita ou migrar para barramentos de cobre maciço com corte a laser em projetos de altíssima potência.*

### 8.3.4 Parâmetros para uma Solda Perfeita

Para obter uma soldagem confiável e segura na bancada de montagem, quatro fatores devem estar alinhados:

- **Pressão dos Eletrodos:** A pressão deve ser firme e constante. Se a pressão for muito leve, ocorrerá um arco elétrico na superfície, furando a fita de níquel e expelindo faíscas perigosas. Se for forte demais, amassará o topo da célula e reduzirá a resistência necessária para fundir o metal.
- **Ajuste de Pulso (Tempo/Energia):** A maioria das máquinas modernas permite configurar o tempo do pulso em milissegundos ou potência (ex: Malha de Pulso 1 e Pulso 2). O primeiro pulso limpa a área e assenta o metal; o segundo realiza a fusão real. Ajuste a energia até que os pontos fiquem limpos, sem marcas pretas de queima carbonizada.
- **Formato dos Pontos:** Cada conexão de célula deve receber, no mínimo, **dois pares de pontos de solda (4 pontos no total)** para garantir redundância mecânica e melhor distribuição da corrente elétrica.
- **Inspeção de Qualidade (O Teste de Arrancamento):** Em uma fita de teste sacrificável, tente arrancar a fita de níquel soldada na célula usando um alicate de bico. A solda é considerada perfeita se a fita rasgar deixando os pequenos "discos" de níquel firmemente fundidos ao metal da célula. Se a fita se soltar inteira deixando a célula limpa, a solda ficou fria e falhará sob vibração.

## 8.4 O Cérebro do Pack: Instalação do BMS

O Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) protege o pack contra sobrecarga, descarga excessiva, sobrecorrente e curtos-circuitos.

- **Fiação de Balanceamento:** Conecte os fios finos de monitoramento em cada série do pack, partindo do terminal negativo total (B-) até o positivo total (B+).
- **Fixação Térmica:** Posicione a placa BMS sobre o pack utilizando uma camada isolante espessa. Se a BMS gerenciar correntes altas, instale um termistor (sensor de temperatura) encostado no centro do bloco de células.

A BMS é o componente eletrônico que impede o seu pack de baterias de explodir ou degradar precocemente. O maior índice de queima de placas BMS na bancada ocorre devido a erros na **sequência de conexão** dos fios de balanceamento.

A BMS monitora a tensão de cada bloco de células em série. Se uma única série atingir (4,25V) (sobrecarga) ou cair abaixo de (2,5V) (descarga excessiva), a placa corta o circuito imediatamente através de transistores de efeito de campo (MOSFETs).

### 8.4.1 A Nomenclatura dos Terminais

Antes de descascar qualquer fio, você deve memorizar o padrão industrial de identificação das placas:

- **B- (Battery Negative):** Terminal que recebe o fio grosso vindo diretamente do **negativo principal/total** do pack de baterias.
- **C- (Charge Negative):** Terminal de onde sai o fio negativo que vai para o **conector do carregador**. (Em placas de circuito comum/separado).
- **P- (Power/Pack Negative):** Terminal de onde sai o fio negativo que vai para a **carga** (o motor do patinete, o inversor, etc.).
- *Nota: Em placas BMS de "Porta Comum" (Common Port), o terminal C- não existe. O terminal P- serve tanto para carregar quanto para descarregar o pack.*
- **B+ (Battery Positive):** O positivo total do pack de baterias **não passa por dentro da BMS eletrônica**. Ele vai direto para o conector de carga e descarga do aparelho, servindo apenas como referência para o fio fino de balanceamento mais alto.

### 8.4.2 A Sequência Obrigatória de Conexão (Regra de Ouro)

Se você conectar o chicote de fios finos na BMS antes de soldar os cabos de potência, a diferença de potencial elétrico flutuante queimará o circuito integrado da placa instantaneamente.

Siga rigorosamente este passo a passo de montagem na bancada:

1. **Conecte o cabo grosso B-:** Solde um cabo de silicone grosso de bitola adequada do polo negativo principal do pack até a pastilha **B-** da BMS.
2. **Organize o chicote de balanceamento desplugado:** Com o conector plástico de pinos finos **fora** da BMS, solde os fios nas séries do pack seguindo a ordem sequencial:
  - **B0 (ou B- fino):** No negativo total do pack (junto com o B- grosso).
  - **B1:** No primeiro barramento positivo de série.
  - **B2:** No segundo barramento positivo de série.
  - **B...:** Repita sucessivamente até o último fio (**B\_máximo**), que deve ser soldado no positivo total do pack (B+).
3. **Faça o teste de segurança com o multímetro:** Antes de plugar o chicote na placa, coloque o multímetro na escala de Corrente Contínua (DC). Aterre a ponta preta no pino **B0** do conector plástico e teste pino por pino com a ponta vermelha. Você deve ler a progressão exata da voltagem (ex: 3,7V, 7,4V, 11,1V, 14,8V...). Se algum valor pular ou der negativo, a fiação está invertida.
4. **Conecte o chicote de balanceamento:** Insira o plugue plástico perfeitamente alinhado na BMS.
5. **Conecte os cabos de saída (P- e C-):** Solde os cabos grossos de saída para o conector de carga e descarga do seu aparelho.



Figura 80 – Placa BMS

#### 8.4.3 Diferença Prática: BMS Hardware vs. Smart BMS

- **BMS de Hardware (Analógica):** Utiliza componentes fixos com valores de corte pré-definidos de fábrica (ex: corta em 2,8V e 4,2V). É robusta, barata e ideal para aplicações simples como ferramentas elétricas e caixas de som.
- **Smart BMS (Digital com Bluetooth/UART):** Possui um microcontrolador interno. Através de um aplicativo de smartphone, você pode alterar os limites de corte, monitorar a temperatura de múltiplos sensores em tempo real e visualizar a corrente exata de descarga. Fundamental para projetos de veículos elétricos e sistemas de energia solar.

#### 8.4.4 Isolamento Térmico e Mecânico da Placa

Os MOSFETs da BMS geram calor considerável quando o pack é submetido a altas correntes.

- **Nunca fixe a BMS com fita adesiva comum direta nas células.** O calor gerado pela placa pode degradar as células logo abaixo dela.
- Cole uma barreira térmica rígida (como uma placa de fibra de vidro epóxi FR4 ou folha espessa de papel cevada) sobre as células.
- Fixe a BMS sobre essa barreira protetora deixando o dissipador de alumínio voltado para o lado externo do pack, facilitando a troca de calor com o ambiente.

### 8.5 Acessórios de proteção

Seguindo os conceitos de segurança elétrica, o pack deve possuir camadas de proteção passiva contra falhas catastróficas.

No capítulo 7 deste livro, descrevemos detalhadamente os acessórios usados comumente para aumentar a segurança do pack de baterias.

#### Especificação Técnica para Lítio-Íon

- **Temperatura de Ação:** As células de lítio sofrem danos permanentes acima de 60°C e entram em fuga térmica (*thermal runaway*) por volta de 80°C a 100°C. Portanto, as proteções térmicas de um pack de baterias devem ser calibrados para atuar entre **65°C e 75°C**, nunca acima disso.

## 8.6 Acabamento e Blindagem Exterior

O acabamento externo é a armadura do pack de baterias.

Após concluir as conexões elétricas, a instalação da BMS e o posicionamento das proteções térmicas, o conjunto ainda está vulnerável à umidade, poeira, perfurações mecânicas e curto-circuito por contato com superfícies externas.

Esta etapa final transforma o aglomerado de componentes em um produto comercial seguro e durável.

- **Isolamento de Plástico de Alta Resistência:** Envolver o pack montado em folhas de isolante plástico (como placa de PVC flexível ou folhas espessas de papel cevada) para evitar perfurações mecânicas.



Figura 81 – PVC termo retrátil para packs de baterias

- **Espaguete Termorretrátil (Shrink Wrap):** O fechamento estético e hermético do pack é feito com tubos termoretáteis de PVC ou PET de alta largura.
- **Corte e Posicionamento:** Corte o tubo deixando uma sobra de aproximadamente (3 cm a 5 cm) além das bordas de cada extremidade do pack. Essa sobra é necessária para que o plástico encolha e curve-se sobre as tampas inferior e superior, selando o conjunto.
- **Técnica de Aquecimento:** Utilize um soprador térmico industrial ajustado entre 120°C e 150°C. Comece aplicando o calor **pelo centro do pack** e mova o fluxo de ar constantemente em movimentos circulares em direção às extremidades.
- **Cuidado Crítico:** Nunca concentre o jato do soprador parado em um único ponto. O calor excessivo local pode romper o termo retrátil e, pior, transferir temperatura excessiva para as células de lítio logo abaixo da proteção.

Para um melhor acabamento, deve-se usar um forno de esteira com tempo e temperatura de aquecimento controláveis.



Figura 82 – Forno de esteira móvel para fechamento de packs

- **Vedação das Extremidades:** Enquanto o plástico ainda estiver morno e maleável nas pontas, utilize uma luva de proteção para pressionar as bordas unindo-as, garantindo o fechamento.

**Envelopamento** Antes de aplicar o revestimento externo final, todo o perímetro do pack deve receber uma blindagem dielétrica (isolante elétrica) e mecânica.

- **com Papel Cevada / Fish Paper:** Utilize folhas espessas de papel cevada adesivo para cobrir todas as faces expostas do pack, especialmente sobre as fitas de níquel soldadas e sobre a fiação de balanceamento da BMS. Isso cria uma barreira resistente a rasgos que impede o atrito direto da carcaça externa com os pontos de solda vivos.
- **Fita Kapton (Poliamida):** Aplique fita Kapton para fixar e imobilizar os chicotes de fios e os sensores de temperatura (TCO/Termistores) nas posições corretas. A fita Kapton é ideal para o miolo do pack porque suporta temperaturas de até 200°C sem derreter ou perder a adesão.

Packs de baterias instalados em veículos (como a base de patinetes elétricos ou o quadro de bicicletas) estão expostos a impactos de pedras, quedas e pressões mecânicas concentradas. O plástico termoretátil sozinho não protege contra perfurações.

- **Placas de Proteção de Impacto (FR4 ou PVC Rígido):** Instale placas finas (0.5 mm a 1 mm) de fibra de vidro epóxi (FR4) ou chapas de plástico PVC rígido cortadas sob medida nas laterais e nas bases do pack.
- **O Objetivo:** Se o aparelho sofrer um forte impacto, a placa rígida distribui a força do choque por toda a estrutura do suporte plástico (*cell holder*), impedindo que um objeto pontiagudo perfure o invólucro metálico de uma célula individual — o que causaria um incêndio imediato.

A água é um dos maiores inimigos das baterias de lítio, pois causa corrosão galvânica acelerada nos barramentos de níquel e pode curto-circuitar os componentes eletrônicos da BMS.

- **Silicone Neutro de Cura Rápida:** Aplique cordões de silicone neutro (específico para eletrônica, que não libera ácido acético e não corrói o cobre) nas extremidades onde os cabos de potência grossos saem do pack.
- **Alívio de Tensão dos Cabos:** Garanta que os cabos de saída estejam ancorados firmemente à estrutura mecânica do pack com fita filamentosa antes de saírem para o exterior. Isso impede que um puxão acidental nos cabos externos force as soldas internas na BMS ou nos barramentos.

## 8.7 Rotulagem e Especificação Técnica

Todo pack de baterias finalizado deve conter uma etiqueta externa de identificação com informações cruciais de segurança e operação:

- **Configuração Elétrica:** Ex: 13S4P - Lítio-Íon (18650).
- **Tensão Nominal e de Pico:** Ex: 48V Nominal / 54.6V Máxima de Carga.
- **Capacidade Real:** Ex: 12Ah / 576Wh.
- **Correntes Limites:** Corrente de carga recomendada (ex: 2A) e corrente de descarga contínua máxima (ex: 30A).
- **Avisos de Segurança:** Tarja de advertência proibindo a abertura do pack, perfuração, exposição ao fogo ou curto-circuito dos terminais.

## 8.8 Instrumentos de medição, equipamentos e segurança

A montagem profissional de packs de baterias de lítio exige precisão laboratorial. Pequenas variações de miliohms ou milissegundos diferenciam um projeto seguro e durável de um risco grave de incêndio. Abaixo, detalhamos as especificações técnicas, critérios de escolha e calibração para o ecossistema de ferramentas de uma boa fábrica de packs de baterias.

### 8.8.1 Instrumentos de Medição, Diagnóstico e Calibração

#### 1. Testadores de Resistência Interna (IR) por Corrente Alternada

- **Padrão Técnico:** O instrumento deve operar no método de **quatro fios (Kelvin)** e aplicar uma frequência de **1kHz em Corrente Alternada (AC)**. Isso elimina a resistência dos próprios cabos de teste da medição final.
- **Análise Prática:** Use as pontas de prova do tipo "sonda de pressão" (pontas retráteis com mola). Pressione-as firmemente no centro limpo do polo da célula. Sujeira ou oxidação elevam a leitura artificialmente.

#### 2. Analisadores de Ciclo e Capacidade Real (Células Individuais)

- **Padrão Técnico:** O carregador/analizador deve possuir a função **NOR TEST (Normal Test)** ou **Discharge Capacity Test**. Ele carrega a célula a 4,2V, realiza uma descarga controlada e constante até 2,5V ou 2,8V, contando os mAh extraídos e a recarrega para tensão de armazenamento 3,7V.
- **Análise Prática:** Configure a corrente de descarga do teste para 0.2C a 0.5C. Valores muito altos distorcem a capacidade real devido ao aquecimento do próprio carregador.

#### 3. Multímetros para Validação de Chicotes

- **Padrão Técnico:** Deve ser um modelo **True RMS** com resolução mínima de 4 dígitos após a vírgula na escala de Milivolts DC (mV).
- **Equipamento Referência:** *Fluke 115, Minipa ET-2231A ou Aneng AN8008.*
- **Análise Prática:** Ao testar o conector da BMS, a ponta preta deve estar cravada no pino negativo total (B0). Ao avançar a ponta vermelha pino por pino (B1, B2, B3), a leitura deve subir em progressões exatas (ex: 4,12V, 8,24V, 12,36V). Qualquer desvio milivoltimétrico indica erro de soldagem no barramento.

### 8.8.2 Maquinário de Fusão e Termofixação

#### 1. Máquinas de Solda Ponto por Descarga de Capacitor (CD)

- **Padrão Técnico:** Máquinas baseadas em transformadores de corrente alternada antigos (como os de micro-ondas modificados) entregam pulsos muito longos (>50ms), aquecendo a célula. O padrão profissional exige tecnologia de **Descarga de Capacitor (Capacitor Discharge)** ou baterias de alta descarga controladas por MOSFETs de precisão, operando com pulsos abaixo de 15ms.

- **Ajuste de Bancada:** Para fita de níquel puro de 0,15mm, configure a máquina para um pré-pulso de 2ms (assentamento) e um pulso principal de 8ms a 12ms. Os eletrodos de cobre do tipo *Alumina-Cobre* devem ser afiados frequentemente com lixa d'água 1200 para manter o diâmetro do ponto padronizado.

## 2. Sopradores Térmicos com Controle Digital de Temperatura

- **Padrão Técnico:** O equipamento deve possuir controle de temperatura em malha fechada (display digital) e ajuste de vazão de ar. Sopradores analógicos simples superaquecem o filme de PVC rapidamente, atingindo mais de 300°C e derretendo os isolantes internos. Para conseguir um padrão excelente de encolhimento do PVC termo retrátil, deve-se usar um forno com esteira deslizante com controle de velocidade e controle de temperatura do forno (figura 82).
- **Ajuste de Bancada:** Fixe a temperatura em exatamente **135°C** com vazão de ar média. Mantenha o bocal a uma distância mínima de 10cm do pack, movimentando-o como um pêndulo. Nunca pare o jato de ar sobre uma única célula.

### 8.8.3 Insumos Técnicos e Homologação de Materiais

#### 1. Fita de Níquel Puro (Especificação Química)

- **Grau Industrial:** Deve possuir pureza mínima de **99,6% de Níquel (Grade Ni200/Ni201)**.
- **Inspeção de Recebimento:** Além do teste químico com sal e do teste de faísca contra esmeril, meça a espessura exata com um **micrômetro digital**. Fitas vendidas como 0,15mm que medem 0,12mm reduzem a capacidade de condução de corrente do pack em 20%, gerando superaquecimento por efeito Joule.

#### 2. Isolantes Dielétricos e Térmicos

- **Papel Cevada (Fish Paper):** Espessura mínima de **0,25mm a 0,40 mm** com adesivo acrílico de alta aderência em uma das faces. Deve possuir certificação UL94-V0 (antichama).
- **Fita Kapton original (Poliamida):** Deve suportar 260°C contínuos e rigidez dielétrica de pelo menos 5kV por milímetro de espessura. Fitas genéricas paralelas usam adesivo à base de borracha que derrete e vira um fluido condutor sob calor, gerando curtos.

#### 8.8.4 Segurança da Bancada

O lítio, quando entra em fuga térmica, não depende do oxigênio da atmosfera para queimar; a reação química interna gera o seu próprio oxigênio e atinge temperaturas superiores a 800°C.

Apagar fogo em baterias de lítio é um desafio, pois elas geram o próprio oxigênio ao queimar e reagem violentamente com a água. A prioridade máxima é o resfriamento contínuo e o isolamento. Em caso de smartphones ou notebooks, utilize extintores Classe D, de espuma, ou cubra com areia.

#### Passos para lidar com o incêndio

1. **Afaste-se e isole o local:** A fumaça é altamente tóxica. Mantenha pessoas e animais a uma distância segura.
2. **Utilize o extintor correto:**
  - **Dispositivos portáteis (celulares, notebooks e tablets):** Use extintores específicos para baterias de lítio (com agentes encapsulantes como F-500), extintores Classe D (para baterias de metal-lítio), ou extintores de espuma/pó químico tipo ABC para abafar.
  - **Baterias maiores (carros elétricos ou patinetes):** O combate direto com extintores comuns é ineficaz. É necessário resfriar a estrutura continuamente com grandes volumes de água ou equipamentos especializados para conter a "fuga térmica".
3. **Abafamento sem extintor:** Se não tiver o extintor adequado, utilize areia seca, grafite em pó ou uma manta antichamas para sufocar o fogo de dispositivos menores.
4. **Acione os bombeiros:** Em incêndios de médio a grande porte (veículos ou sistemas de armazenamento de energia), chame o Corpo de Bombeiros (telefone 193) imediatamente e não tente apagar sozinho.

#### O que NÃO fazer

- **Evite usar água pura em baterias de lítio metálico ou grandes baterias em curto:** A água reage com o lítio, liberando calor e gás hidrogênio altamente inflamável, o que pode aumentar o fogo.
- **Não mova a bateria em chamas sem proteção:** Utilize luvas térmicas e proteções adequadas caso precise isolar um pequeno aparelho em uma área externa e segura.

**Contenção Física Seca:** Mantenha um balde de 20 litros cheio de **areia seca ou vermiculita expandida** diretamente acima ou ao lado da bancada. Em caso de fumaça ou faíscas vindas do pack, o conjunto deve ser submerso imediatamente na areia para abafar a propagação das chamas e conter os gases tóxicos (como o gás fluoreto de hidrogênio).

#### **8.8.5 Checklist de Controle de Qualidade (CQ) e Inspeção Final**

Este é o protocolo de segurança laboratorial obrigatório a ser executado antes do primeiro acionamento elétrico (*power-on*) e do fechamento definitivo do pack com o tubo termoretátil. Nenhuma bateria deve sair da bancada sem a aprovação em 100% dos itens abaixo.

##### **Fase 1: Inspeção Visual e Estrutural (Estática)**

- **Verificação de Alinhamento das Células:** Todas as células estão perfeitamente encaixadas nos suportes plásticos (*cell holders*), sem folgas ou desalinhamentos que possam forçar as conexões elétricas?
- **Anéis de Papel Cevada (Polo Positivo):** Foi colado um anel isolante de papel cevada no topo de **cada uma** das células do pack antes da soldagem? Nenhum anel foi esquecido ou ficou desalinhado?
- **Isolamento de Invólucros (*Shrink Wraps*):** O plástico colorido original de fábrica de todas as células foi inspecionado? Há algum micro-rasgo ou arranhão que exponha o corpo de metal (polo negativo) nas laterais?
- **Inspeção Física da BMS:** A placa BMS está mecanicamente isolada do topo das células por uma barreira rígida (placa FR4 ou papel cevada espesso)? Nenhum componente eletrônico da placa está pressionando fisicamente os barramentos de níquel?

##### **Fase 2: Inspeção das Conexões Elétricas e Soldagem**

- **Avaliação dos Pontos de Solda:** Todos os polos receberam no mínimo 4 pontos de solda ponto (2 pares)? Há marcas pretas, furos no metal da célula ou resíduos carbonizados que indiquem queimadura por excesso de pulso?
- **Teste de Ancoragem Mecânica:** Foi feito o teste de leve estresse mecânico (com espátula plástica) nas fitas de níquel? Há alguma fita solta, "solda fria" ou ponto oscilante que possa se desprender sob vibração?
- **Roteamento dos Fios de Balanceamento:** Os fios finos do chicote de monitoramento estão organizados e protegidos por fita Kapton? Eles passam longe de quinas vivas das fitas de níquel para evitar o rompimento do isolamento por atrito?

### Fase 3: Medições, Métricas e Testes de Voltagem (Com Multímetro)

- **Equalização das Séries (Delta V):** Medindo a tensão de cada bloco em paralelo individualmente, a diferença entre o bloco de maior voltagem e o de menor voltagem é **menor que 0,02V**?
- **Mapeamento Sequencial do Conector da placa BMS:** Com o chicote de balanceamento desplugado da BMS, a leitura pino a pino no multímetro avança em progressão matemática exata a partir de B0 (Negativo Total)? Não há nenhuma inversão de polaridade?
- **Continuidade do Fusível Térmico (TCO), se houver:** O TCO (fusível térmico) foi testado na escala de continuidade (bipe) do multímetro antes de ser integrado? Ele está posicionado no miolo térmico do pack ou colado ao dissipador da BMS?
- **Validação do Fusível Geral de Potência, se houver:** O fusível DC geral (lâmina ou cartucho) está instalado na linha do positivo principal (B+), e sua capacidade está dimensionada adequadamente para a corrente de pico do projeto?

### Fase 4: Validação Operacional e Funcional (BMS Ligada)

- **Tensão de Saída Pós-BMS:** Após plugar o chicote na BMS, a tensão medida nos terminais externos de saída (B+) e (P-) é **idêntica** à tensão medida diretamente nos polos principais da bateria (B+) e (B-)?
  - *Nota técnica: Se a tensão na saída da BMS for significativamente menor (ex: indicando 3V ou 4V em um pack de 36V), os MOSFETs da placa estão bloqueados por segurança ou a BMS está danificada.*
- **Teste de Absorção de Carga:** Conectando o carregador homologado para o projeto, a corrente de recarga sobe de forma estável? A BMS aceita a carga sem desarmar e sem aquecimento anormal nos transistores?
- **Teste de Descarga sob Carga Controlada:** Submetendo o pack a uma carga de teste (banco de resistências ou motor em bancada) equivalente a 50% da sua capacidade de projeto, a bateria sustenta a corrente sem sofrer uma queda excessiva de tensão em nenhum dos blocos de série?

## Fase 5: Selagem e Registro Histórico

- **Fixação Estrutural e Proteção contra Impacto:** As placas rígidas antiperfuração (FR4/PVC) foram fixadas nas faces laterais e na base do pack com fita filamentosa de fibra de vidro?
- **Vedação de Saída de Cabos:** Os cabos grossos de potência possuem alívio de tensão mecânica interno? A saída foi vedada com silicone neutro (livre de ácido acético)?
- **Etiqueta de Identificação e Rastreabilidade:** O pack recebeu a etiqueta externa contendo a química, tensão nominal, capacidade em Ah, além dos avisos mandatórios de segurança?



Figura 83 – Etiquetas de Identificação do pack de baterias

- **Registro em Prontuário:** A numeração do lote das células, os valores medidos de resistência interna média e a assinatura do técnico responsável foram salvos no prontuário de fabricação do pack?

## Capítulo 9: Manufatura Avançada

### 9.1 Triagem Automatizada: Classificação por Resistência Interna (IR) e Tensão de Circuito Aberto (OCV)

Em projetos profissionais, não basta que as células sejam do mesmo modelo; elas precisam ser "gêmeas" elétricas. A triagem automatizada (ou manual rigorosa) elimina o desbalanceamento prematuro do pack.

#### 1. O que é IR (Internal Resistance)?

A Resistência Interna é o "obstáculo" que a corrente enfrenta dentro da célula.

- **Por que medir:** Se você misturar uma célula de **15mΩ** com uma de **45mΩ** no mesmo grupo paralelo, a de menor resistência trabalhará muito mais, esquentará e morrerá primeiro, arrastando o pack todo.
- **Ferramenta:** Medidores AC de 1kHz são essenciais aqui.

#### 2. O que é OCV (Open Circuit Voltage)?

É a tensão da célula em repouso, sem carga conectada.

- **O Teste de Autodescarga:** Meça a tensão de todas as células e anote. Deixe-as paradas por 15 dias. Se uma célula cair mais de **0.05V** em relação às outras, ela possui uma micro-fuga interna e deve ser descartada.

#### 3. O Processo de Classificação (Cell Grading)

Para packs de alta performance, utilize o método de **Agrupamento (Grouping)**:

1. **Separação por IR:** Crie "caixas" de tolerância (Ex: Grupo A: 12-14mΩ | Grupo B: 15-17mΩ).



Figura 84 – Máquina de separação de células por IR e tensão

2. **Distribuição de Capacidade:** Use softwares de *Cell Repack* (ou planilhas) para distribuir as células de forma que cada grupo em série (S) tenha a capacidade total somada o mais idêntica possível.

#### 4. Vantagens da Triagem

- **Vida Útil:** Reduz drasticamente o trabalho do BMS no balanceamento.
- **Segurança:** Evita o superaquecimento de células individuais (hotspots) durante descargas pesadas.
- **Confiabilidade:** Garante que a performance do pack seja consistente do primeiro ao último quilômetro.

Ao usar máquinas de triagem automatizada, o montador consegue processar centenas de células por hora, garantindo um padrão industrial que agrega muito valor (e preço) ao produto final.

#### Tabela de Tolerâncias para Triagem (Grade A vs. Grade B)

Ao classificar suas células, utilize os limites abaixo como regra de corte. Células que flutuam fora dessas margens não devem ser misturadas no mesmo pack.

Parâmetro	Lítio-Íon (NMC)	LiFePO4 (LFP)	Ação Recomendada
Delta OCV (Tensão)	Max. 0.01V	Max. 0.02V	Se > 0.05V, a célula tem alta autodescarga. <b>Descartar.</b>
Variação de IR	2-3 mΩ	5-10 mΩ	Agrupar células com IR idêntica no mesmo paralelo (P).
IR Máxima (18650)	< 35 mΩ	< 50 mΩ	Se > 60 mΩ, a célula esquentará sob carga. <b>Rejeitar.</b>
Capacidade (mAh)	2%	3%	Distribuir a média para que cada série (S) seja igual.

#### Como interpretar os dados para o seu Pack:

1. **O Desvio de Tensão (OCV):** Se você mediu as células hoje e, após 15 dias, uma delas caiu **30mV** a mais que as outras, ela é uma "vazadora". No pack final, ela vai drenar o seu grupo paralelo constantemente, forçando o BMS a trabalhar 24h por dia para equilibrar.
2. **A Resistência Interna (IR) e a Carga:** Em packs de e-bike ou drones, a IR é mais importante que a capacidade. Uma célula com IR alta "murcha" (voltage sag) sob aceleração, fazendo o motor perder força mesmo com a bateria cheia.

3. **Casamento de Células (Cell Matching):** O segredo de um Power Wall que dura 10 anos é garantir que a **soma da capacidade** de cada grupo paralelo seja idêntica. Se o Grupo 1 tem 20.000mAh e o Grupo 2 tem 19.500mAh, o pack sempre morrerá quando o Grupo 2 acabar, desperdiçando a energia do Grupo 1.

Sempre faça a medição de IR com a célula em **Storage Voltage (3.7V)**. Medir a resistência com a célula totalmente vazia ou totalmente cheia pode gerar leituras inconsistentes em alguns equipamentos.

## 9.2 Soldagem Industrial: Processos a Laser, Ultrassom e Resistência Robotizada

Na manufatura avançada, o tópico soldagem industrial explora como as grandes fábricas (Tesla, BYD) montam milhares de packs por dia com precisão que supera o esforço manual.

Enquanto a soldagem a ponto manual é ideal para protótipos e pequenos lotes, a escala industrial exige processos com **repetibilidade de 99,99%** e menor estresse térmico possível.

### 1. Soldagem a Laser (Laser Welding)

É a tecnologia de ponta atual. Um feixe de laser de alta potência funde os metais sem contato físico.

- **Vantagens:** Extremamente rápida e precisa. Permite soldar barramentos de cobre (mais condutivos que o níquel) diretamente nos terminais.
- **Aplicação:** Packs de veículos elétricos (EV) de alta performance, onde cada grama de resistência interna economizada conta.

### 2. Soldagem por Ultrassom (Ultrasonic Bonding)

Utiliza vibrações mecânicas de alta frequência para criar uma solda de estado sólido (sem derretimento total do metal).

- **Vantagens:** É o processo mais "frio" que existe. Não há faíscas nem calor excessivo, o que protege a química sensível da célula.
- **Aplicação:** Conexão de fios finos (*wire bonding*) em packs de alta densidade, muito comum em células cilíndricas de marcas premium.

### 3. Soldagem por Resistência Robotizada (CNC Spot Welding)

É a evolução da solda ponto manual. Um braço robótico ou uma mesa CNC controla os eletrodos.

- **Vantagens:** Elimina o erro humano. A pressão do eletrodo e o tempo do pulso são monitorados por sensores em tempo real. Se uma solda falha (como a "Solda Fria" do seu guia), a máquina para e alerta o operador.
- **Aplicação:** Linhas de produção de baterias de e-bikes e ferramentas sem fio em larga escala.

### 4. Comparativo de Processos Industriais

Método	Velocidade	Custo de Equipamento	Principal Benefício
Ponto (CNC)	Média	Médio	Confiabilidade e baixo custo de insumos.
Laser	Altíssima	Altíssimo	Solda cobre e metais dissipadores.
Ultrassom	Alta	Alto	Zero estresse térmico na célula.

Mesmo em pequena escala, entender esses processos ajuda a escolher o melhor método de conexão (como barramentos parafusados vs. soldados) dependendo do nível de corrente do projeto.

### 9.3 Inspeção de Qualidade: Testes de estanqueidade, testes dielétricos (Hi-Pot) e Visão Computacional

Em uma linha de produção profissional, a qualidade não é apenas "olhar se a solda ficou bonita". São realizados testes físicos e elétricos rigorosos para garantir a segurança do usuário final.

#### 1. Testes de Estanqueidade (Leak Testing)

Essencial para packs que ficarão expostos ao tempo (E-bikes, barcos, baterias externas).

- **O Teste:** O pack selado é submetido a uma leve pressão de ar positiva ou negativa. Sensores medem se há queda de pressão.
- **Objetivo:** Garantir a certificação **IP67/IP68**, assegurando que água e poeira não entrarão no pack, o que causaria corrosão e curtos-circuitos.

## 2. Teste Dielétrico ou Hi-Pot (High Potential)

Este é o teste definitivo de isolamento elétrico.

- **O Teste:** Aplica-se uma alta tensão (muito superior à nominal do pack) entre os circuitos vivos (células/fios) e a carcaça/chassi.
- **Objetivo:** Verificar se o isolamento (fitas Kapton, papel cevada, suportes) é capaz de conter a eletricidade sem "vazamentos" ou arcos elétricos. É o que evita que o usuário leve um choque ao tocar no case metálico da bateria.

## 3. Visão Computacional (AI Inspection)

Substitui ou auxilia o olho humano na linha de montagem usando câmeras de alta resolução e inteligência artificial.

- **Diagnóstico Automatizado:** O sistema analisa cada ponto de solda instantaneamente, comparando-o com os padrões da sua imagem de referência.
- **O que ele detecta:**
  - **Soldas Queimadas:** Identifica fuligem e furos pretos.
  - **Soldas Frias:** Detecta "caudas de cometa" ou falta de penetração do metal.
  - **Posicionamento:** Verifica se o BMS e os sensores de temperatura estão no milímetro correto.

## 4. Ciclo de Teste de Fim de Linha (EOL - End of Line)

Antes de ir para a caixa, o pack passa por um ciclo rápido de carga e descarga para validar:

- Comunicação do Smart BMS.
- Calibração do medidor de carga (SoC).
- Funcionamento de todos os sensores térmicos.

Para o pequeno montador, o equivalente ao teste de Visão Computacional é a **macrofotografia**. Tirar fotos em close de cada grupo de solda antes de fechar o pack é uma prova documental de qualidade que pode ser enviada ao cliente, gerando um valor percebido altíssimo.

## 9.4 Checklist Geral de Inspeção Final (Aprovação para Uso)

Antes de considerar o pack "Concluído", marque cada item deste checklist. Se um único ponto falhar, o pack não deve ser selado.

### 1. Validação das Células e Estrutura

- **Casamento de Células:** Todas as séries (S) possuem capacidade (mAh) e resistência interna (IR) equilibradas?
- **Espaçamento Físico:** As células estão presas em suportes plásticos e não se tocam?
- **Isolamento de Polos:** O papel cevada (Barley Paper) está presente em todos os polos positivos?

### 2. Qualidade da Soldagem (Conforme Guia Visual)

- **Integridade Mecânica:** Foi feito o teste de tração em amostras e o níquel rasgou (Solda Ideal)?
- **Inspeção Óptica:** Não existem furos pretos, fuligem ou "caudas de cometa" nas conexões?
- **Bitola do Níquel:** A espessura da fita de níquel é compatível com a corrente máxima do projeto?

### 3. Sistema de Gerenciamento (BMS)

- **Sequência de Balanço:** A fiação do BMS foi conferida com multímetro antes de ser plugada?
- **Sensor de Temperatura:** O NTC está fixado no ponto mais quente do pack e protegido com fita Kapton?
- **Fixação:** O BMS está isolado da fita de níquel e bem fixado para não vibrar?

### 4. Segurança e Acabamento

- **Teste Hi-Pot / Isolamento:** Não há continuidade entre os polos vivos e a carcaça externa?
- **Selagem:** O termoretrátil está firme, sem bolhas e com as extremidades protegendo os cabos?
- **Identificação:** O pack possui etiqueta com Tensão (V), Capacidade (Ah), Data de Montagem e Avisos de Segurança?

## 9.5 Rastreabilidade: Integração de dados de produção e serialização de células

O tópico **Rastreabilidade** é o que diferencia uma oficina de fundo de quintal de uma fábrica certificada. Ele garante que, se um pack falhar daqui a dois anos, você saiba exatamente de qual lote veio cada célula e quem a soldou.

A rastreabilidade é a capacidade de reconstruir o histórico de um pack. Em conformidade com normas como a **ISO 9001**, cada bateria deve ter uma "certidão de nascimento" digital.

### 1. Serialização de Células (Cell Mapping)

Cada célula individual possui um QR Code ou Datamatrix gravado pelo fabricante.

- **O Processo:** Antes da montagem, as células são escaneadas. O sistema vincula o ID da célula à sua posição específica no pack (Ex: Célula ID #A932 está na Série 4, Paralelo 2).
- **Objetivo:** Se houver um recall de um lote específico da Samsung ou LG, você consegue identificar exatamente quais packs foram afetados sem precisar abri-los.

### 2. Geração do Serial do Pack (Battery Passport)

Ao finalizar o pack, ele recebe um número de série único (Ex: BP-2024-0001). Este serial deve estar vinculado a um banco de dados contendo:

- **Data e Hora:** Momento exato da montagem e testes.
- **Operador:** Quem realizou a soldagem e a inspeção final.
- **Relatórios de Teste:** O gráfico de OCV/IR e o teste de capacidade final (EOL).
- **Insumos:** Lote do BMS utilizado e fornecedor do níquel.

### 3. Integração com Sistemas MES (Manufacturing Execution System)

Em linhas automatizadas, os dados de soldagem (corrente, milissegundos e pressão do eletrodo) são salvos para cada ponto de solda.

- **Vantagem:** Se a máquina detectou uma variação de pressão na solda da célula #42, o sistema marca o pack automaticamente para inspeção manual antes do fechamento.

#### 4. Etiquetagem e QR Code Externo

O pack final deve portar uma etiqueta técnica resistente ao calor com um QR Code. Ao escanear, o cliente (ou técnico de manutenção) tem acesso a:

- Data de fabricação e validade da garantia.
- Protocolo de segurança e química (Li-ion/LFP).
- Instruções de descarte ecológico.

Para o pequeno produtor, rastreabilidade pode ser feita em uma **planilha simples ou Google Forms**. O importante é nunca perder o vínculo entre o número de série do pack e as fotos do processo interno (como o seu guia de diagnóstico de solda).

### 9.6 Manual de Garantia e Termos de Uso

No mercado de baterias, a garantia é um tema sensível. Diferente de um motor mecânico, uma bateria pode ser destruída em segundos por mau uso. Este tópico ensina como redigir um termo que seja justo e seguro.

#### 1. O que a Garantia DEVE Cobrir

- **Defeitos de Fabricação:** Falha em células novas (curto interno prematuro).
- **Falhas de Montagem:** Rompimento de soldas (desde que o pack não tenha sofrido queda) ou erro na fiação do BMS.
- **Componentes Eletrônicos:** Queima do BMS por defeito do componente (não por sobrecarga externa).

#### 2. O que a Garantia NÃO Cobre (Exclusões)

Este é o ponto mais importante para proteger o seu negócio:

- **Descarga Profunda:** Células que chegaram a 0V porque o cliente deixou o pack parado por meses sem carregar.
- **Danos por Calor/Fogo Externo:** Exposição ao sol ou armazenamento em locais acima de 60°C.
- **Violação do Lacre:** Se o termo retrátil ou os lacres de segurança foram rompidos.
- **Curto-Circuito Externo:** Marcas de queimado nos conectores de saída (indica que o cliente encostou os fios ou usou controlador incompatível).
- **Danos por Água:** Exceto se o pack tiver certificação IP67 comprovada e o uso estiver dentro das normas.

## Capítulo 10: Gerenciamento Térmico e Proteção Física

O gerenciamento térmico é o pilar mais crítico para a segurança, durabilidade e eficiência de um pack de baterias de Lítio-Íon. Enquanto a eletrônica da BMS protege o circuito contra anomalias elétricas, o controle de temperatura gerencia a física e a química das células.

Neste capítulo, abordaremos os limites térmicos do lítio, os mecanismos de transferência de calor e os métodos de engenharia para mitigar o superaquecimento.

### 10.1 A Janela Térmica Operacional do Lítio-Íon

As células de Lítio-Íon são extremamente sensíveis a extremos de temperatura. Para garantir o desempenho ideal e evitar a degradação precoce, o projeto deve manter o pack dentro de faixas estritas:

- **Faixa Ótima de Operação (15°C a 35°C):** É a zona de máxima eficiência química, onde a resistência interna é estável e a degradação por ciclos é minimizada.
- **Limite Máximo de Descarga (60°C):** Acima deste ponto, os componentes internos começam a sofrer degradação acelerada. A maioria dos fabricantes estipula o corte de descarga obrigatório em 60°C.
- **Limite Máximo de Carga (45°C):** Recarregar células de lítio acima de 45°C causa instabilidade na camada SEI (*Solid Electrolyte Interphase*), gerando perda permanente de capacidade energética.
- **O Ponto de Não-Retorno (80°C a 120°C):** Nesta faixa, ocorre a **Fuga Térmica (*Thermal Runaway*)**. Os separadores plásticos internos derretem, o eletrólito entra em ebulição gerando gases inflamáveis e o oxigênio liberado pelos óxidos do catodo alimenta uma combustão violenta e auto-sustentada.

### 10.2 Fontes de Geração de Calor no Pack

Para projetar um sistema de dissipação eficiente, é preciso entender de onde vem o calor. A geração térmica em um pack possui duas origens principais:

#### Calor Químico/Entrópico

Gerado pelas reações químicas de transferência de íons de lítio entre o anodo e o catodo. É mais acentuado durante processos de carga rápida.

## Calor por Efeito Joule (Resistivo)

Decorrente da corrente elétrica ( $I$ ) passando pela resistência interna ( $R_i$ ) das células e dos barramentos de níquel. É calculado pela equação:

$$P=I^2 \times R_i$$

*Exemplo Prático:* Se um bloco paralelo possui uma resistência interna combinada de  $15\text{m}\Omega$  e descarrega uma corrente de  $20\text{A}$ , a potência dissipada em forma de calor puro será de  $20^2 \times 0,015 = 6\text{W}$  por bloco. Em um pack de 13 séries, isso representa quase  $80\text{W}$  de calor contínuo confinado no invólucro.

## 10.3 Estratégias de Dissipação Passiva

A dissipação passiva não consome energia elétrica do pack e é a mais utilizada em eletroportáteis, bicicletas elétricas e patinetes devido ao baixo custo e simplicidade mecânica.

- **Convecção por Espaçamento Físico:** Como detalhado no tópico 8.2.1, a folga de  $1\text{mm}$  a  $2\text{mm}$  gerada pelos suportes plásticos (*cell holders*) impede que o calor de uma célula seja transferido por condução direta para a vizinha, criando canais verticais para o fluxo natural de ar quente.
- **Materiais de Interface Térmica (TIM):** Fitas térmicas condutivas, graxas de silicone ou *thermal pads* são aplicados entre o corpo das células e as carcaças de alumínio externas. Eles preenchem os vazios de ar (que é um péssimo condutor térmico) e transferem o calor para o exterior do pack.
- **Dissipadores de Calor na BMS:** Os MOSFETs da BMS geram calor extremo sob alta descarga. Eles devem receber placas de alumínio aletadas isoladas eletricamente por mantas de mica ou silicone térmico.

## 10.4 Estratégias de Dissipação Ativa

Utilizadas em packs de alta performance (veículos elétricos, bancos de baterias industriais e carros de corrida) onde a dissipação passiva não é suficiente para conter o efeito Joule.

- **Convecção Forçada por Ar:** Microventiladores (coolers) são integrados ao gabinete do pack. O fluxo de ar é direcionado horizontalmente através dos canais dos suportes plásticos. Exige o uso de filtros para evitar a entrada de umidade e poeira condutiva.
- **Arrefecimento Líquido:** O método mais eficiente do mercado. Tubulações finas de alumínio moldado passam entre as células, conduzindo um fluido refrigerante (geralmente uma mistura de água e etilenoglicol). O líquido absorve o calor do miolo do pack e o dissipa em um radiador externo.

## 10.5 Arquitetura de Monitoramento Térmico

O gerenciamento térmico ativo ou passivo depende de dados precisos coletados em tempo real pela BMS.

### Posicionamento de Termistores (NTC)

A BMS deve possuir sensores de temperatura físicos (termistores) estrategicamente colados com fita Kapton. O posicionamento deve priorizar:

1. **O Miolo Térmico:** Exatamente no centro geométrico do bloco de células, onde o calor fica aprisionado e a temperatura é intrinsecamente mais alta.
2. **A Proximidade dos Bornes Principais:** Próximo às conexões de saída de corrente, onde a fita de níquel sofre maior estresse resistivo.

### O Papel do TCO como Salvaguarda Final

Como revisado nas seções anteriores, o fusível térmico (TCO) atua de forma totalmente independente do software da BMS.

Se a eletrônica falhar e a temperatura do miolo atingir o limite físico calibrado (ex: 70°C), o composto interno do TCO derrete e desliga o pack permanentemente, interrompendo a progressão para uma fuga térmica destrutiva.

### Comparativo Térmico: Células Cilíndricas (18650/21700) vs. Células Prismáticas

A escolha do formato físico das células dita não apenas o design mecânico do pack, mas também a eficiência do seu sistema de arrefecimento. Abaixo, analisamos o comportamento térmico das duas geometrias mais utilizadas no mercado industrial e de veículos elétricos.

#### 1. Células Cilíndricas (Ex: 18650, 21700, 4680)

Baterias cilíndricas possuem uma carcaça rígida de aço onde os componentes internos (anodo, catodo e separador) são enrolados firmemente como um rolo de rocambole (*jelly-roll*).

- **Vantagem do Espaçamento Natural:** Devido ao formato redondo, quando agrupadas lado a lado, elas criam naturalmente vazios geométricos entre si. Mesmo sem suportes plásticos espessos, esses "canais tridimensionais" permitem a passagem de ar por convecção natural ou forçada.
- **Gradiente Térmico Radial (O Desafio):** O calor é gerado no miolo interno do rolo condutor, mas o aço da carcaça externa está em contato com o ar. Isso cria um gradiente térmico: o centro da célula fica muito mais quente do que

a superfície externa. Em modelos grandes (como as novas 4680), a dissipação radial perde eficiência, exigindo sistemas de resfriamento líquido que toquem diretamente os polos (*tab-cooling*), e não apenas as laterais.

- **Área de Contato Reduzida:** Superfícies curvas possuem menor área de contato plano. Para usar placas de resfriamento líquido (*cooling plates*), é necessário moldar serpentinas em formato de ondas que circundam cada célula, o que encarece e complexifica o projeto mecânico.

## 2. Células Prismáticas

Baterias prismáticas possuem um formato retangular (em blocos rígidos de alumínio ou plástico) onde as camadas internas são empilhadas ou dobradas de forma plana. Elas são muito comuns em sistemas de energia solar residencial (estacionárias) e carros elétricos modernos.

- **Excelente Área de Contato Plano:** Por possuírem faces perfeitamente retas e planas, a transferência de calor por condução é altamente eficiente. É extremamente simples encostar uma placa de alumínio de arrefecimento líquido ou um grande *thermal pad* em uma das faces da célula para extrair o calor de forma homogênea.
- **Efeito "Sanduíche" e Pontos de Calor:** Como elas são projetadas para serem compactadas firmemente umas contra as outras (para economizar espaço), o calor gerado nas células centrais do bloco fica completamente enclausurado. Sem um sistema ativo de dissipação na base ou no topo, o miolo do pack prismático atinge temperaturas críticas muito mais rápido que um pack cilíndrico.
- **Expansão Térmica (*Swelling*):** Durante ciclos de carga pesada ou degradação química por calor, as faces planas das células prismáticas tendem a estufar devido à pressão dos gases internos. Esse estufamento altera a pressão mecânica entre as células e pode criar bolsões de ar isolantes, destruindo a eficiência do contato com as placas térmicas de dissipação.

**Tabela Comparativa de Propriedades Térmicas**

<b>Critério de Análise</b>	<b>Células Cilíndricas (18650 / 21700)</b>	<b>Células Prismáticas (Blocos Rígidos)</b>
Facilidade de Dissipação Passiva	<b>Alta</b> (canais de ar naturais entre círculos)	<b>Baixa</b> (blocos compactados barram o ar)
Eficiência de Condução Direta	<b>Baixa</b> (exige fitas/serpentinhas curvas)	<b>Excelente</b> (grandes superfícies planas)
Homogeneidade de Temperatura	<b>Desigual</b> (miolo central retém mais calor)	<b>Mais uniforme</b> (ao longo da face plana)
Sensibilidade à Expansão (Calor)	<b>Nula</b> (carcaça de aço impede deformação)	<b>Alta</b> (estufa as laterais se superaquecer)
Complexidade do Sistema Ativo	<b>Alta</b> (exige tubos de refrigeração moldados)	<b>Baixa</b> (basta uma placa fria na base do pack)

Para projetos de **pequeno e médio porte** (ferramentas elétricas, patinetes, bicicletas e caixas de som), as **células cilíndricas** são soberanas devido à facilidade de controle térmico passivo por espaçamento.

Para projetos de **grande porte e alta densidade energética** (bancos de baterias residenciais para inversores ou veículos elétricos de alta performance), as **células prismáticas** entregam mais energia por metro cúbico, desde que o projetista inclua obrigatoriamente um sistema de arrefecimento líquido ou placas condutoras de alumínio integradas à base metálica do gabinete.

## Capítulo 11: Protocolos de Testes

Após a fabricação, os packs de baterias devem ser submetidos a testes de controle de qualidade. Muitos são os testes que podem ser feitos numa bateria. Alguns testes são bastante rápidos e podem assegurar que o pack de baterias está em boas condições operacionais a menos da sua capacidade.

Por outro lado, a medida da capacidade do pack de baterias (mAh) normalmente demanda várias horas de ensaio, o que torna esse tipo de teste bastante difícil de ser efetuado em todos os packs de baterias que são fabricados.

Empresas idôneas testam 100% de sua produção através de testes rápidos e medem a capacidade de algumas amostras para cada lote fabricado

Após o fechamento mecânico e a validação pelo checklist de Controle de Qualidade (CQ), o pack de baterias não deve ser liberado imediatamente para uso do cliente. Ele deve passar por um protocolo rigoroso de **testes dinâmicos e comissionamento na bancada**.

Estes testes validam o comportamento químico real do conjunto sob estresse elétrico, garantem que a BMS está calibrada e confirmam a eficácia do gerenciamento térmico projetado.

### 11.1 O Teste de Ciclo de Capacidade Real (Carga e Descarga Completa)

Este teste quantifica a energia real que o pack consegue entregar em condições controladas, permitindo confrontar o valor prático com o cálculo teórico do projeto.

- **Equipamento Necessário:** Carga Eletrônica DC Programável ou analisadores industriais ou banco de resistências com wattímetro integrado.



Figura 85 – Carga Eletrônica Regulável 150V – 60 A



Figura 86 – Carga eletrônica 150V – 240 A

- **Procedimento Prático:**

1. Efetue a carga total do pack utilizando o carregador padrão até o corte automático da BMS (4,2V por célula, ou 54,6V no caso de um pack de 13S).
2. Deixe o pack descansar em aberto (*open-circuit voltage*) por 1 a 2 horas para estabilização química e térmica.
3. Inicie a descarga contínua a uma taxa padrão de 0.5C (metade da capacidade nominal em amperes. Por exemplo, para um pack de 14Ah, descarregue a 7A até que a BMS atinja o corte por subtensão 2,5V a 2,8V por célula.

- **Análise do Resultado:** O display da carga eletrônica informará a capacidade real extraída em Ampères-hora (Ah) e Watt-hora (Wh). O pack é considerado aprovado se entregar **pele menos 95% da capacidade nominal projetada**.

## 11.2 O Teste de Estresse por Corrente Máxima (*Load Stress Test*)

O objetivo deste ensaio é simular a pior condição de uso que o pack enfrentará na prática (como uma subida íngreme em uma bicicleta elétrica ou o travamento do motor de uma ferramenta).

- **Procedimento Prático:**
  1. Com o pack carregado a 100%, configure a carga eletrônica para extrair a **corrente contínua máxima de projeto**
  2. Mantenha essa descarga por pelo menos 15 a 20 minutos ininterruptos.
- **Métricas de Avaliação:**
  - **Queda de Tensão (*Voltage Sag*):** Monitore a queda imediata de voltagem ao aplicar a carga. Se a tensão total despencar agressivamente (ex: cair mais de 4V instantaneamente), isso indica alta resistência interna global, pontos de solda mal executados ou fita de níquel subdimensionada.
  - **Estabilidade das Células:** A BMS não deve desarmar durante este período.

## 11.3 Teste de Validação dos Limites de Proteção do BMS

Este teste força cenários de falha elétrica controlada para garantir que os sistemas de segurança (hardware e software) estão operacionais.

### A. Teste de Corte por Sobrecarga (*Overcharge Protection*)

- **Como fazer:** Conecte uma fonte de bancada regulável no canal de carga. Eleve a tensão ligeiramente acima do limite do carregador (ex: configure para 55,5V em um pack de 54,6V com corrente baixa 1A).
- **Resultado Esperado:** A BMS deve interromper a entrada de corrente assim que a primeira célula/série atingir o limite programado (geralmente entre 4,25V e 4,28V).

## B. Teste de Corte por Descarga Excessiva (*Over-discharge Protection*)

- **Como fazer:** Durante o teste de capacidade (Item 11.1), monitore a voltagem da série mais fraca.
- **Resultado Esperado:** A BMS deve cortar totalmente a saída de energia assim que essa série atingir o limite crítico (geralmente entre 2,5V e 2,8V), impedindo a inversão química da célula.

## C. Teste de Curto-Circuito (Apenas para BMS com Proteção por Hardware)

- **Aviso de Segurança Extrema: Nunca** faça isso fechando os fios grossos diretamente com a mão. Utiliza-se um disjuntor rápido DC conectado por cabos longos em ambiente isolado.
- **Resultado Esperado:** Ao fechar o curto, a BMS deve desarmar em microssegundos ( $\mu$ s). A tensão na saída vai a zero. Para religar, a maioria das placas exige desconectar a carga ou plugar o carregador por alguns segundos.

## 11.4 Rastreamento e Mapeamento Térmico Dinâmico

Realizado simultaneamente ao *Teste de Estresse por Corrente Máxima* (Item 11.2). Ele valida fisicamente os conceitos de gerenciamento térmico estudados no capítulo anterior.

- **Método 1: Termografia Invermelha (Câmera Térmica):** É o método ideal. Faça uma varredura visual do pack sem o termo retrátil enquanto ele descarrega em alta corrente.
  - *O que procurar:* **Pontos quentes (Hotspots).** Se um único ponto de solda ou uma célula específica estiver registrando 15°C acima das vizinhas, ali existe um defeito de montagem (solda fria) ou uma célula com defeito químico.
- **Método 2: Termômetro Laser (Infravermelho com Mira):** Caso não possua câmera térmica, meça manualmente três pontos a cada 5 minutos: o centro do bloco de células, as fitas de níquel principais e o dissipador de alumínio da BMS.
- **Critério de Rejeição:** Se o miolo do pack ultrapassar **55°C** ou se os MOSFETs da BMS passarem de **85°C** operando dentro da corrente nominal do projeto, o sistema de dissipação falhou. O pack deve ser desmontado e redimensionado.

### **11.5 O Teste de Envelhecimento Térmico Estático (*Burn-in / Shelf Test*)**

Após passar por todos os testes dinâmicos com sucesso, o pack deve receber uma carga final até a tensão de armazenamento nominal (geralmente 3,7V a 3,8V por célula, ou cerca de 48V totais) e ser colocado em quarentena.

- **Período:** 48 a 72 horas em repouso absoluto na prateleira de segurança.
- **Validação:** Meça a tensão exata do pack com o multímetro de precisão antes e depois da quarentena.

*Análise:* A queda natural de tensão não deve passar de **0,01V a 0,02V** em todo o período. Uma queda maior indica que a BMS possui consumo estático excessivo (fuga de corrente) ou que há uma célula com micro curto interno remanescente que passou despercebida na triagem inicial.

## Capítulo 12: O Ciclo de Vida do Pack de Baterias (Life Cycle Management)

O ciclo de vida de um pack de baterias de Lítio-Íon abrange desde o momento de sua ativação química na bancada até o seu esgotamento e destinação final. Compreender esse ciclo é essencial para estimar o retorno financeiro do projeto, prever manutenções preventivas e garantir uma operação sustentável.

### 12.1 O que define a "Vida Útil" de um Pack?

Diferente de outros componentes eletromecânicos, a vida útil de uma bateria de lítio não é medida estritamente em meses ou anos, mas sim em **Ciclos de Carga e Descarga**

**Definição de 1 Ciclo:** Corresponde à descarga de 100% da capacidade nominal da bateria e uma recarga subsequente de 100%. Dois usos de 50% intercalados por uma recarga parcial equivalem a exatamente 1 ciclo completo.

- **O Critério de Fim de Vida (80% SOH):** Industrialmente, considera-se que um pack atingiu o fim de sua vida útil primária quando a sua **Saúde da Bateria (State of Health - SOH)** cai para **80% da sua capacidade original**. Se um pack foi projetado com 14Ah, ele atinge o seu EOL (end of life – fim de vida) quando, após o teste de capacidade em bancada, ele só consegue reter 11,2Ah.
- *Nota: O pack não para de funcionar após os 80%, mas a degradação química se acelera drasticamente a partir deste ponto, e a queda de tensão (voltage sag) sob carga pesada torna-se excessiva.*

### 12.2 Mecanismos Químicos de Degradação (O Envelhecimento)

A perda de capacidade de um pack ocorre devido a fenômenos microscópicos inevitáveis dentro das células:

- **Crescimento da Camada SEI (Solid Electrolyte Interphase):** Uma película passivadora se forma naturalmente no anodo durante as primeiras cargas. Com o uso, essa camada engrossa, consumindo íons de lítio livres e aumentando a resistência interna ( $R_i$ ) do pack.
- **Plating de Lítio (Deposição Metálica):** Ocorre principalmente quando o pack é carregado sob frio extremo ou com correntes acima do especificado. Os íons de lítio acumulam-se na superfície do anodo em forma de metal sólido, criando ramificações microscópicas chamadas **dendritos**. Os

dendritos podem perfurar o separador plástico interno, causando curtos-circuitos catastróficos.

- **Estresse Mecânico por Expansão:** O anodo e o catodo expandem e contraem fisicamente a cada ciclo. Esse estresse gera microfissuras nos eletrodos, isolando partes do material ativo da célula.

### 12.3 Fatores que Aceleram a Degradação (Como Evitar)

Embora o envelhecimento seja natural, as decisões do usuário e a engenharia do projeto ditam a velocidade desse processo.

- **Profundidade de Descarga (DoD - *Depth of Discharge*):** Descarregar o pack sempre até 0% (100% DoD) estressa severamente a química. Se o usuário operar o pack em uma janela de 80% DoD (carregando até 90% e descarregando até 10%), a vida útil em ciclos pode **dobrar ou triplicar**.
- **Tensão de Corte Superior:** Manter o pack constantemente em 100% de carga (4,2V por célula) sob alta temperatura acelera a oxidação do eletrólito. Armazenar o pack totalmente carregado por longos períodos é prejudicial.
- **Correntes Elevadas (C-Rate):** Cargas ultrarrápidas ou descargas contínuas no limite máximo da célula geram calor excessivo por efeito Joule, acelerando todas as reações de degradação química.

### 12.4 As Fases da Vida de um Pack de Baterias

Fase	Tipo de Uso / Destino	Estado de Saúde (SOH)	Tempo de Vida Estimado	Aplicações e Processos Químicos
<b>Fase 1</b>	Uso Primário	100% a 80%	<b>8 a 12 anos</b>	Veículos Elétricos, Ferramentas de Alta Potência.
<b>Fase 2</b>	Segunda Vida ( <i>Second Life</i> )	80% a 50%	<b>5 a 10 anos</b>	Armazenamento Solar Residencial, Nobreaks, Estabilização de Rede.
<b>Fase 3</b>	Descarte e Reciclagem	Abaixo de 50%	<b>Fim do ciclo físico</b>	<b>Moagem mecânica, Pirometalurgia</b> (fundição a alta temperatura) e <b>Hidrometalurgia</b> (lixiviação química ácida) para extração de Lítio, Cobalto e Níquel.

## **Segunda Vida (*Second Life*)**

Quando um pack automotivo ou de alta performance atinge os 80% de SOH, ele se torna inadequado para veículos devido à perda de arrancada e autonomia. No entanto, esses packs são perfeitamente utilizáveis para **aplicações estacionárias**, como armazenamento de energia solar residencial, geradores de backup ou suporte de carga para sistemas de TI (Nobreaks), onde o peso e o volume não são restrições críticas. Nessa fase, a bateria pode operar por mais 5 a 10 anos.

### **12.5 Destinação Final e Reciclagem Coercitiva**

Ao final da segunda vida (geralmente abaixo de 50% de SOH), o pack torna-se lixo eletrônico perigoso. O descarte em lixo comum é estritamente proibido por normas ambientais devido à toxicidade do eletrólito e ao risco de incêndios em aterros.

- **Processo de Reciclagem Hidrometalúrgica:** O pack é completamente descarregado, desmontado mecanicamente e triturado em ambiente controlado para gerar a chamada *Black Mass* (massa negra). Esse pó rico em metais passa por processos químicos de lixiviação ácida para separar e recuperar **Lítio, Cobalto, Níquel e Manganês** com pureza de grau de bateria, reiniciando o ciclo de fabricação de novas células.

## Capítulo 13: Aplicações Práticas (Estudos de Caso)

O projeto adequado de um pack de baterias deve levar em consideração todos os fatores já mencionados neste livro.

Quanto mais células ou quanto maior é a corrente do pack de baterias, mais cuidadoso deve ser o projeto para que o pack de baterias seja seguro e tenha vida longa mantendo as especificações necessárias.

Na internet encontram-se muitos vídeos do tipo “faça você mesmo”, ou mesmo empresas sem um mínimo de condições técnicas oferecendo montagem de packs de baterias.

Fuja dessas empresas e procure sempre utilizar os serviços de empresas que tenham as melhores condições de engenharia para esse tipo de serviço.

A seguir mostramos à título de exemplo, dois projetos de packs e baterias, o primeiro usando o software de projeto desenvolvido pela STA – Sistemas e Tecnologia Aplicada e o segundo fazendo os cálculos manualmente.

### 13.1 Projeto 1 - 12V - 7Ah - uso de software de projeto

Trata-se de projeto de um pack de baterias de lítio-íon, para substituir bateria de chumbo ácido de 12V / 7Ah usada na alimentação de equipamento eletrônico. Um bom projeto de pack de baterias começa com uma boa especificação técnica.

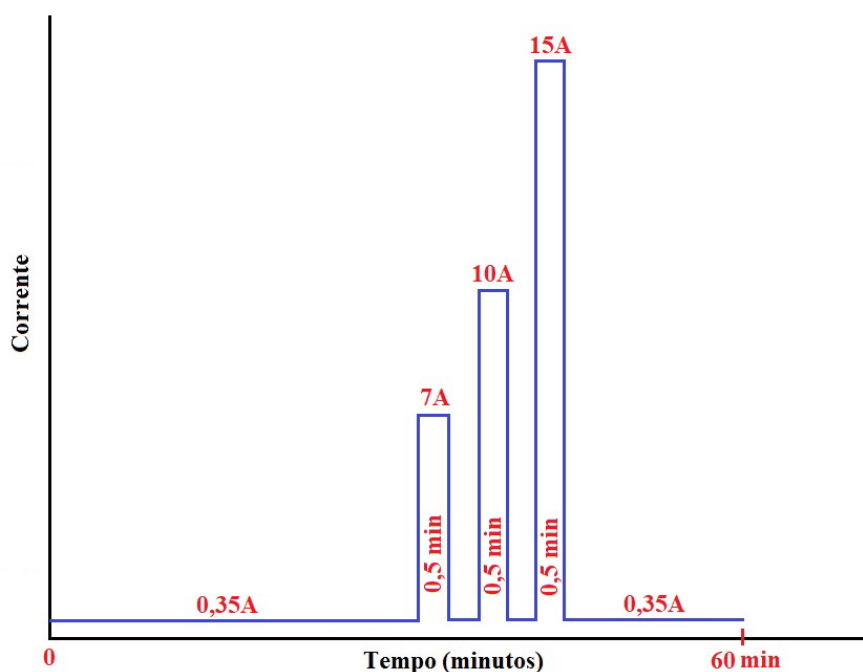


Figura 87 – Cálculo da corrente média no pack de baterias

O ideal é se conhecer o perfil de corrente que o pack de baterias deverá fornecer (figura 87).

As especificações técnicas do pack de baterias objeto de nosso exemplo são as seguintes:

- Aplicação do pack de baterias: Alimentação de equipamento eletrônico
- Tensão: 12V
- Capacidade mínima: 6.500 mAh – duração da energia da bateria de 10 horas
- Corrente nominal do equipamento: 350 mA
- Ciclo de trabalho horário:
  - 58,5 minutos com 350mA;
  - 0,5 minutos com 7 A;
  - 0,5 minutos com 10 A;
  - 0,5 minutos com 15 A
  
- Proteção térmica por NTC de 10K $\Omega$
- Proteção de sobre corrente por PTC
- Proteção térmica por termostato – 2 fios de saída para contator
- Placa BMS para proteção
- Conector com 5 fios: Positivo, Negativo, NTC, Termostato fio 1, Termostato fio 2
- Temperatura Ambiente durante operação do pack de baterias: 30 °C

Os dados apresentados nessa especificação, são os dados mínimos que devem ser conhecidos para poder executar um bom projeto de packs de baterias. O projeto deste pack foi feito usando o software de projeto de packs de baterias Probat – Versão 7.5 - desenvolvido pela empresa S.T.A. Sistemas e Tecnologia Aplicada.

O primeiro passo no projeto do pack é o cálculo da corrente média. Na figura 88 é mostrada a tela do software de cálculo, para cálculo da corrente média do pack de baterias.

<div style="text-align: center;"> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ESPECIFICAÇÃO</span>  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">APAGAR TUDO</span>  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ATUALIZAR ESPECIFICAÇÃO</span> </div>		
CORRENTE (mA)	TEMPO (minutos)	mA.minuto
350	58,50	20475,00
7000	0,50	3500,00
10000	0,50	5000,00
15000	0,50	7500,00
TEMPO TOTAL (min)	60,00	
CORRENTE MÉDIA (mA)		607,92

**Figura 88 – Cálculo da corrente média no pack de baterias**

A corrente média para o ciclo de trabalho especificado é de 607,92 A com pico de corrente de 15 A por 0,5 minutos.

A figura 89 mostra a tela do software onde se inserem as especificações básicas do pack de baterias a ser calculado:

- Tensão (V)
- Capacidade (mAh)
- Corrente Média (mA)
- Corrente de Pico (mA)
- Largura Máxima (mm)
- Profundidade Máxima (mm)
- Altura Máxima (mm)

S.T.A.		APAGAR			SELECIONAR CÉLULAS			RECALCULAR		
ESPECIFICAÇÃO DO PACK					PACK CALCULADO FALTAM DADOS					
TENSÃO (V)	CAPACIDADE (mAh)	CORRENTE (mA)			TENSÃO (V)	CAPACIDADE (mAh)	CORRENTE MÉDIA (mA)			
12,0	6.500	608								
CORRENTE DE PICO (mA)	ENTRAR COM CICLO	L mm	P mm	A mm	CORRENTE DE PICO (mA)	DURAÇÃO (h)	L mm	P mm	A mm	
15.000		120	65	90						

Figura 89 – Tela com as especificações básicas do pack de baterias

A figura 90 mostra a tela do software onde se selecionam as células possíveis de serem utilizadas no pack de baterias.

Para este pack de baterias foi selecionada a célula código 35752, de LiFePO<sub>4</sub> com 3,2V – 3.300 mAh – 3C

Células	ATUALIZAR		SELECIONAR CÉLULA (ctrl a)		SELECIONAR TUDO		
	ESPECIFICAÇÃO		CÉLULAS SELECIONADAS				FAZER SIMULAÇÕES PRÉVIAS
		SIMULAÇÕES					
Codigo	Item	Descrição					
35751	RTLFP018650-1500-3C	BATERIA RECARREGÁVEL LITIO FOSFATO DE FERRO 3,2V 1500MAH 18X65M 3C					
35752	RTLFP026650-3300-3C	BATERIA RECARREGÁVEL LITIO FOSFATO DE FERRO 3,2V 3300MAH 26X65M 3C					
35753	RTLFP014500B-600-3C	BATERIA RECARREGÁVEL LITIO FOSFATO DE FERRO 3,2V 600MAH 14X50MM 3C C/TOP					
36046	RTLFP032650-5000-5C	3,2V-5000MAH LIFEPO4- 5C PARA FERRAMENTAS - 32650 - 32,30 x 70,43mm					
36049	RTLFP018650-1500-5C	3,2V-1500MAH LIFEPO4 5C PARA FERRAMENTAS - 18650 - 18x65 mm					
36084	RTLFP026650-3000-CP	3,2V - 3000MAH LITIO FOSFATO DE FERRO 26X65M C/ PCM					
36085	RTLFP026650-3000-SP	3,2V - 3000MAH LITIO FOSFATO DE FERRO 26X65M S/ PCM					

Figura 90 – Tela para a seleção das células a serem utilizadas

<b>S.T.A.</b>		<b>APAGAR</b>			<b>SELECIONAR CÉLULAS</b>			<b>RECALCULAR</b>		
<b>ESPECIFICAÇÃO DO PACK</b>					<b>PACK CALCULADO OK</b>					
TENSÃO (V)	CAPACIDADE (mAh)	CORRENTE (mA)			TENSÃO (V)	CAPACIDADE (mAh)	CORRENTE MÉDIA (mA)			
<b>12,0</b>	<b>6.500</b>	<b>608</b>			<b>12,8</b>	<b>6.600</b>	<b>608</b>			
CORRENTE DE PICO (mA)	<b>ENTRAR COM CICLO</b>	L mm	P mm	A mm	CORRENTE DE PICO (mA)	DURAÇÃO (h)	L mm	P mm	A mm	
<b>15.000</b>		<b>120</b>	<b>65</b>	<b>90</b>	<b>19.800</b>	<b>10,86</b>	<b>104</b>	<b>52</b>	<b>65</b>	
NUM. MÓDULOS	TIPO DE MÓDULO	TIPO MONTAGEM			TIPO FIOS DE SAÍDA	MONT. NORMAL/DE	OFFSET (V)			
<b>4</b>	<b>1S-2P</b>	<b>01A-02C</b>			<b>DC</b>	<b>N</b>				
CÓDIGO CÉLULA	MODELO CÉLULA	TIPO CÉLULA			TENSÃO CÉLULA (V)	CAPACIDADE CÉL. (mAh)	COR. MÁX. CÉLULA (mA)			
<b>35752</b>	<b>RTLFP02665 0-3300-3C</b>	<b>LF-3.2</b>			<b>3,2</b>	<b>3.300</b>	<b>9.900</b>			
LARGURA CÉLULA (mm)	PROFUND. CÉLULA (mm)	ALTURA CÉLULA (mm)	PESO CÉLULA (g)		PREÇO CÉLULA (US\$)	PREÇO PACK (US\$)				
<b>26</b>	<b>26</b>	<b>65</b>	<b>85</b>		<b>8,74</b>					

**Figura 91 – Tela com os dados do pack de baterias calculado pelo software**

A figura 91 mostra a tela do software com os dados do pack de baterias calculado levando em consideração a célula escolhida e as especificações técnicas fornecidas pelo cliente.

O pack de baterias calculado pelo software tem as seguintes características:

- Tensão: 12,8V
- Capacidade: 6.600 mAh
- Corrente média: 607,92 mA
- Corrente de pico: 19,8 A
- Duração da Energia do pack de baterias com corrente média de 607,94 mA: 10,86 horas
- Dimensões: 104 x 52 x 65 mm
- Peso: 680 g
- Número de Células: 8
- Ligação das células: 4S-2P (4 em série – 2 em paralelo)

Uma bateria de chumbo ácido de 12V / 7Ah possui dimensões de 151 x 65 x 94 mm e peso de 2,1 kg. Portanto o pack de baterias calculado pelo software é menor e bem mais leve que uma bateria selada comum. A etapa seguinte do projeto, envolve a escolha dos elementos de proteção do pack de baterias. A figura 91 mostra a tela do software onde essa escolha é feita. Nessa tela também são escolhidos os fios e conectores do pack de baterias.

ACESSÓRIOS			POSIÇÃO ACESSÓRIOS							CONECTOR DE SAÍDA + / -				CONECTOR ACESSÓRIOS					
MODELOS			POSIÇÃO PTC'S							CÉLULAS SAÍDA B+		CÉLULAS SAÍDA B-		NTC - CONECTOR					
PCM	NTC	FUSIST	PTC 1	PTC 2	PTC 3	PTC 4	PTC 5	PTC 6	PTC 7	PIN	COR	PIN	COR	PIN	COR	PIN	COR		
35768	35795		2											4	AZ	5	AZ		
PTC		TERMOST.	POSIÇÃO TERMOSTATO							PCM SAÍDA P+		PCM SAÍDA P-		SE PIN=0 - LIGA NO NEGATIVO					
35804		35943									PIN	COR	PIN	COR	TERMOSTATO - CONECTOR				
PVC		CONECTOR		POSIÇÃO FUSISTOR							1	VM	2	PT	PIN	COR	PIN	COR	
35871		36371									PCM SAÍDA °C				7	AM	8	AM	
FIOS CM		FIOS	CAPAC.		CAPACITOR DE ALTO PULSO							PIN	COR			SE PIN=0 - LIGA NO NEGATIVO			
20		36401																	
TAGS		DIODO																	
35964																			

Figura 92 – Tela do software para escolha dos acessórios de proteção

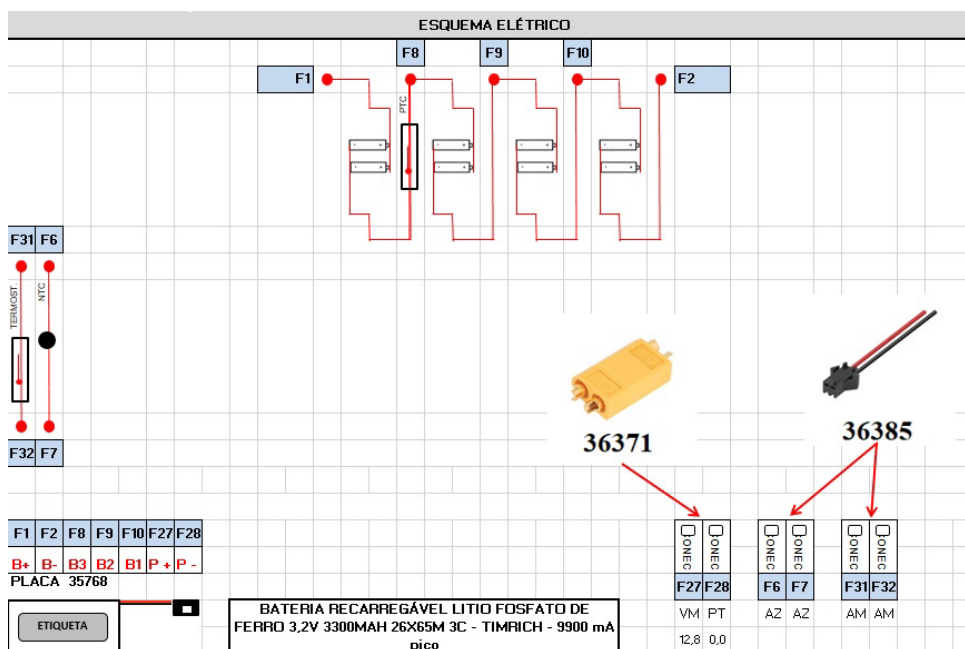


Figura 93 – Desenho elétrico do pack de baterias



A figura 96 mostra uma foto do pack montado, onde pode-se observar a placa PCM( Protection Circuit Module) ou BMS e o termostato.

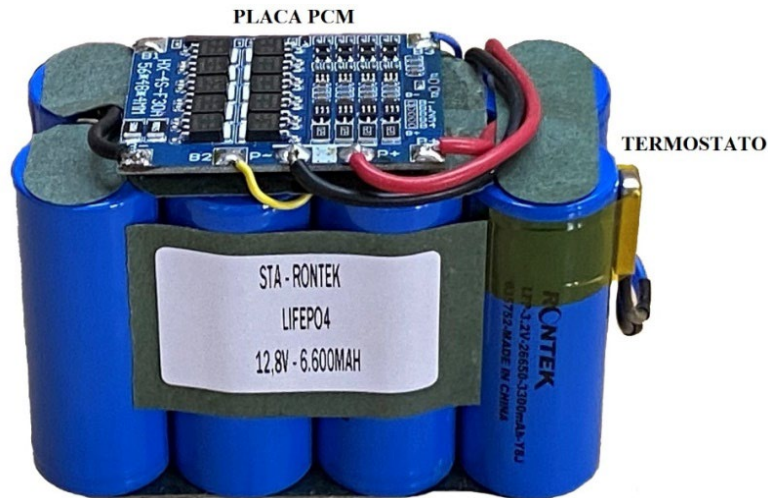


Figura 96 – Foto do pack de baterias calculado

## 13.2 Projeto 2 – 12V – 10AH – projeto manual

Para projetar um pack de baterias, você precisa definir os requisitos da sua carga elétrica e calcular a quantidade de células em série (para atingir a tensão) e em paralelo (para atingir a capacidade e corrente).

Abaixo está um exemplo prático e detalhado de um **projeto de pack de baterias de Lítio-Íon (Li-Ion) de 12V e 10Ah**, ideal para alimentar pequenos robôs, caixas de som portáteis ou sistemas de iluminação.

### 1. Especificações do Projeto

- **Tensão nominal do pack:** 12V (Faixa real: 11,1V a 12,6V)
- **Capacidade do pack:** 8 Ah. Se quisermos um pack com margem de folga na capacidade, devemos optar por 10Ah (10.000 mAh)
- **Corrente de descarga máxima exigida:** 10A
- **Célula escolhida:** Samsung INR18650-25R (Tensão nominal: 3,7V | Capacidade: 2,5Ah / 2500mAh | Descarga máx: 20A)

### 2. Cálculos de Configuração (Série e Paralelo)

Cada célula possui parâmetros fixos. Para alcançar os valores do projeto, combinamos as células em uma configuração conhecida como **3S4P** (3 células em Série e 4 em Paralelo).

### **Número de Células em Série (S) — Define a Tensão**

A conexão em série soma as tensões de cada célula.

Células em Série = Tensão do Pack / Tensão da Célula =  $12/3,7 = 3,24$

**Decisão:** Adotamos **3S** (3 células em série), resultando em  $3 \times 3,7V = 11,1V$  nominal (12,6V quando totalmente carregada).

### **Número de Células em Paralelo (P) — Define a Capacidade**

A conexão em paralelo soma a capacidade (Ah) e divide a corrente entre as células.

Células em Paralelo} = Capacidade do Pack/Capacidade da Célula =

$$10Ah/2,5Ah = 4$$

**Decisão:** Adotamos **4P** (4 células em paralelo).

### **Total de Células no Pack**

Total =  $S \times P = 3 \times 4 = 12$  células

## **3. Lista de Componentes Necessários**

- **12 Células Li-Ion 18650:** De marcas confiáveis como Panasonic, LG ou Samsung.
- **1 Placa BMS (Battery Management System) 3S / 20A:** Item de segurança obrigatório para monitorar subtensão, sobretensão, balanceamento e curto-circuito.
- **Fita de Níquel Puro (0,15mm):** Utilizada para fazer as conexões elétricas sem derreter com a corrente.
- **Suportes plásticos para células (Spacers):** Mantêm o espaçamento físico correto para evitar curto-circuito e ajudar na dissipação térmica.
- **Isolante de papel cevada (Barley paper):** Adesivos isolantes para proteger os polos positivos.
- **Termotubo PVC largo:** Capa externa para isolar e proteger mecanicamente todo o pack.

#### 4. Diagramas de Montagem

A estrutura física organiza os grupos de 4 células em paralelo, conectados em seguida em 3 blocos em série. As figuras 97, 98 e 99 foram geradas pelo software PROBAT V.7.5 desenvolvido pela empresa STA – Sistemas e Tecnologia Aplicada.

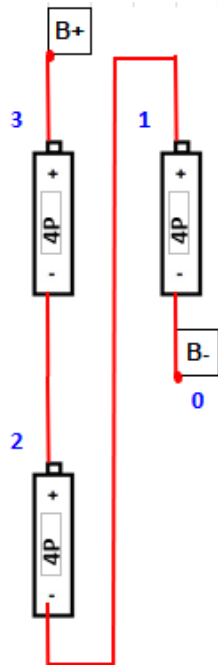


Figura 97 – Esquema de ligação das células – 4P indica 4 em paralelo

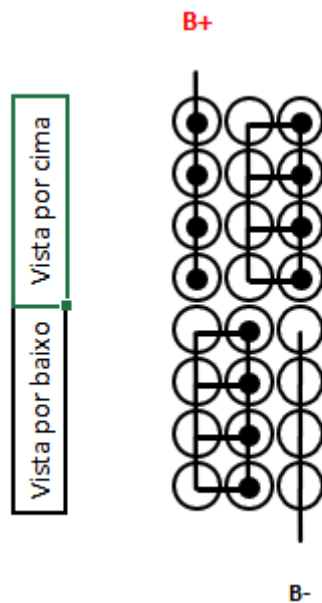


Figura 98 – Esquema de soldagem das células – vista por cima e por baixo

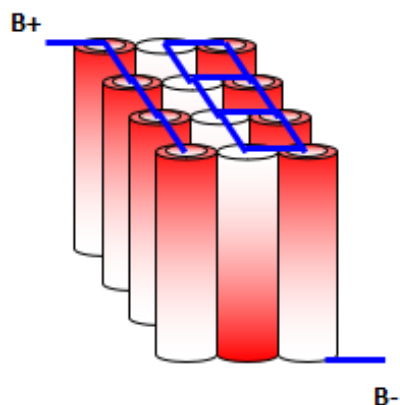


Figura 99 – Vista 3D

#### Conexões da Placa BMS:

1. **B-**: Conectado ao polo negativo geral do primeiro bloco (0V).
2. **B1**: Conectado na primeira ponte de série (3,7V).
3. **B2**: Conectado na segunda ponte de série (7,4V).
4. **B+**: Conectado ao polo positivo geral do último bloco (11,1V).
5. **P+ / P-**: Terminais externos de saída para carregar o pack e alimentar sua carga.

#### 5. Processo de Construção Prática

1. **Equalização de Tensão**: Antes de iniciar, garanta que todas as 12 células estejam exatamente com a mesma voltagem (ex: 3,60V) para não danificar o circuito.
2. **Montagem Física**: Encaixe as células nos suportes plásticos alternando a orientação dos polos conforme o diagrama de série.
3. **Soldagem por Pontos**: Utilize uma máquina de solda por ponto para fixar a fita de níquel nos polos. **Nunca utilize ferro de solda comum diretamente nos polos da bateria**, pois o calor excessivo destrói a química interna e gera risco de explosão.
4. **Instalação da BMS**: Solde os fios de monitoramento da placa BMS nas respectivas pontes de níquel.
5. **Isolamento e Acabamento**: Aplique o papel cevada nos cantos vivos e envolva o pack com o termo retrátil de PVC, encolhendo-o com um soprador térmico.

## Capítulo 14: Avaliação de Fornecedores

### Como Encontrar Fornecedores Confiáveis

O sucesso do seu pack depende da procedência das células. Como o mercado muda rápido, em vez de links fixos, use estes critérios para validar seus fornecedores:

1. **Reputação em Fóruns Técnicos:** Pesquise pelo nome da empresa na internet e veja as avaliações e conteúdo do site.
2. **Datasheets Disponíveis:** Bons vendedores fornecem as especificações técnicas exatas do lote que estão vendendo.
3. **Avaliações com Testes Reais:** Procure por fornecedores que enviem amostras para homologação.
4. **O Teste do Lote:** Ao comprar de um fornecedor novo, adquira uma amostra pequena (4 a 8 células), teste-as rigorosamente e, se aprovadas, compre o restante do mesmo lote.

A homologação de um fornecedor de packs de baterias é o filtro que garante a segurança jurídica, financeira e civil da sua empresa ou projeto. Como baterias de lítio envolvem riscos reais de incêndio e passivos ambientais, a escolha não deve ser baseada apenas no menor preço.

### 1. Capacidade de Engenharia e Rastreabilidade

Um fornecedor confiável precisa comprovar o controle absoluto sobre o processo de fabricação:

- **Rastreabilidade de Lote:** Pergunte se eles fornecem o prontuário de fabricação do pack, identificando o lote exato das células (ex: se usam de fato Samsung, LG ou Molicel legítimas).
- **Casamento de Células (*Cell Matching*):** Questione quais são os critérios internos de tolerância para Resistência Interna (Ri) e Capacidade (mAh) na montagem dos blocos em paralelo.
- **Processo de Soldagem:** Verifique se utilizam solda ponto por descarga de capacitor industrial e fitas de **níquel puro**, recusando fornecedores que utilizam aço niquelado ou solda manual com estanho.

## 2. Certificações e Normas de Segurança (Mandatório)

Baterias de lítio não podem ser transportadas legalmente ou comercializadas em larga escala sem certificações de conformidade. Exija os laudos de testes dos seguintes padrões:

- **UN38.3 (Transporte Seguro):** É a certificação internacional obrigatória da ONU. Ela garante que o pack passou por testes de vibração, choque mecânico, curto-circuito externo, impacto, sobrecarga e vácuo térmico, provando que ele não vai explodir no transporte aéreo ou rodoviário.
- **IEC 62133 / UL 2580:** Normas globais de segurança química e mecânica para células e packs de lítio em aplicações portáteis ou automotivas.
- **Homologação Local (Ex: Anatel / Inmetro):** Se o seu pack for integrado a um produto de telecomunicação ou eletrodoméstico que exija certificação compulsória no Brasil, certifique-se de que o fabricante possui laboratórios parceiros para facilitar o processo de certificação do produto final.

## 3. Validação dos Componentes de Segurança Passiva

O projeto elétrico do fornecedor deve refletir as melhores práticas do mercado:

- **Arquitetura da BMS:** O fornecedor utiliza BMS com proteção de hardware dedicada ou Smart BMS com registro de *log* de erros? Ela possui sensores de temperatura (termistores) redundantes no miolo do pack?
- **Presença de Proteções Físicas:** Certifique-se de que o fornecedor insere **Fusíveis Térmicos (TCO)** calibrados para cortar o circuito entre 65°C e 75°C e fusíveis automotivos/industriais DC gerais de sobrecorrente.

## 4. Estrutura de Garantia, Logística Reversa e Descarte

O ciclo de vida da bateria gera obrigações legais para quem vende o produto no mercado:

- **Garantia de Desempenho (SOH):** O fornecedor garante quantos ciclos de carga e descarga antes que o pack atinja 80% de Saúde da Bateria (*State of Health*)? Eles oferecem suporte local para reparos ou substituição de placas BMS defeituosas?
- **Logística Reversa (Legislação Ambiental):** No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos dita que baterias de lítio exigem descarte adequado. Avalie se o fornecedor possui parceria com empresas de reciclagem hidrometalúrgica ou se oferece o serviço de coleta de packs degradados no fim de vida útil (*End of Life*).

## Matriz de Decisão Rápida para Fornecedores

Critério de Avaliação	Fornecedor Excelente (Homologado)	Fornecedor de Baixo Custo (Risco Alto)
Datasheet e Amostras	Fornece curvas de testes de <i>voltage sag</i> e IR.	Entrega apenas fotos e a capacidade nominal.
Laudos Técnicos	Apresenta laudos de ensaios em laboratório (mesmo que próprio)	Diz que "cumpre as normas", mas não tem os laudos.
Isolamento Interno	Usa suportes plásticos e papel cevada/Kapton.	Usa cola quente direta nas células e fita isolante comum.
Suporte Técnico	Engenheiros disponíveis para alinhar o projeto da BMS.	Atendimento focado apenas no setor comercial.

Para a montagem de packs de baterias de Lítio voltados a **dispositivos portáteis elétricos e eletrônicos** no modelo **OEM (Original Equipment Manufacturer)**, o ecossistema brasileiro possui montadores consolidados. Diferente do mercado automotivo ou de energia solar, o segmento de portáteis exige engenharia focada em miniaturização, precisão de solda, ergonomia e conformidade de peso/volume.

Abaixo, apresentamos um dos principais parceiros locais homologados, as vantagens da fabricação nacional e as etapas para iniciar o seu projeto.

### 1. Principais Montadores OEM Locais (Foco em Portáteis)

- **STA Eletrônica (São Paulo - SP):** Uma das referências mais antigas e estruturadas do mercado nacional (atuando desde 1999). Possui laboratórios próprios para testes de ciclo e engenharia dedicada. Desenvolvem packs sob medida para eletrônicos médicos, equipamentos de medição, segurança, equipamentos portáteis de campo e coletores de dados.

### 2. Vantagens Estratégicas de Montar Localmente

Optar por um parceiro OEM nacional em vez de importar o pack de Lítio pronto da Ásia traz benefícios cruciais para a cadeia de suprimentos:

- **Mitigação do Risco Logístico da ONU (UN38.3):** O transporte internacional de baterias de lítio prontas por via aérea é extremamente burocrático e caro (considerado Carga Perigosa Classe 9). Trazer as **células soltas** da Ásia e montar o pack em solo nacional reduz significativamente os custos e o tempo de frete.

- **Ajuste Físico Dinâmico:** Para eletrônicos portáteis, cada milímetro conta. Desenvolver o projeto com engenheiros locais permite testar fisicamente o encaixe do mockup do pack no chassi de plástico do seu produto antes de rodar o lote final.
- **Certificação Compulsória Simplificada:** Se o seu portátil for passar por homologação da **Anatel ou Inmetro**, os montadores nacionais já utilizam insumos e BMS pré-testadas e fornecem a documentação técnica em português exigida pelos órgãos certificadores.

### 3. Como Enviar o Escopo para Orçamento (Roteiro)

Ao entrar em contato com a engenharia desses fornecedores, o seu documento de escopo de projeto (*RFP*) deve conter:

1. **Dimensões Máximas do Berço:** O espaço físico exato (em mm) disponível dentro do gabinete do seu aparelho portátil.
2. **Parâmetros Elétricos:** Tensão nominal de trabalho (V), capacidade mínima desejada (mAh) e a corrente de consumo contínua e de pico (A) do seu circuito elétrico.
3. **Ambiente de Operação:** O aparelho portátil trabalhará sob calor, umidade externa ou sofrerá impactos mecânicos constantes (ex: ferramentas elétricas)?
4. **Previsão de Lote (Tiragem):** Quantidade de packs para a fase de protótipo e estimativa de demanda mensal/anual para a linha de produção.

#### Fornecedores e Serviços Especializados no Brasil

Se você busca componentes com garantia ou até serviços de montagem sob demanda:

- **STA Eletrônica:** Especialista em projetos e montagem industrial de packs, incluindo tecnologias LiFePO4 e Lítio-Íon – [www.sta-eletronica.com.br](http://www.sta-eletronica.com.br)

## Capítulo 15: Segurança



Figura 100 – Bateria de lítio polímero estufada

### 15.1 Visão geral sobre a segurança das baterias de lítio íon

A segurança da bateria de lítio-íon despertou grande interesse pelo público nos últimos anos. Esta tecnologia de bateria tem aumentado sua participação no mercado desde os anos 2000. Está associada ao desenvolvimento do mercado de equipamentos sem fio, tais como telefones celulares, computadores portáteis, ferramentas elétricas e veículos elétricos. Na Europa é a tecnologia de bateria preferida para e-bikes e já está sendo utilizada em carros híbridos e veículos elétricos completos.

O número de baterias recarregáveis de lítio-íon usadas em aplicações sem fio é bem superior a um bilhão de unidades por ano e espera-se que ele cresça ainda mais. Isso mostra que apesar de terem ocorrido alguns problemas de segurança, a tecnologia das baterias lítio-íon é bastante segura.

Para garantir um uso seguro das baterias de lítio-íon são necessárias algumas medidas. O primeiro passo da abordagem de gerenciamento de segurança começa com uma análise das funções da bateria e suas interações com o meio ambiente. Isso é chamado de análise de perigo preliminar ou identificação de perigo.

Esta fase, destina-se a cobrir todos os aspectos do ciclo de vida: design e qualificação, fabricação, transporte, uso e fim da vida. Isso resulta em uma lista de perigos potenciais para uma determinada aplicação e o nível de segurança

associado. Limitar as consequências do perigo potencial no meio ambiente é um importante caminho: isso tem que ser desenvolvido em coordenação com a aplicação, a fim de estabelecer medidas de proteção eficientes.

Na prática, nenhum "dispositivo único" é capaz de cumprir todas as funções para a proteção da bateria. O gerenciamento de segurança é obtido com uma combinação de escolhas de tecnologia e materiais para aperfeiçoar o desempenho versus a reatividade dos materiais.

Deve-se atuar em três níveis.

- No nível da célula
  1. Utilização de componentes de boa qualidade nos eletrodos e separadores
  2. A célula deve possuir válvula de segurança para aliviar a pressão interna excessiva
  3. A célula deve possuir dispositivo para interromper correntes excessivas
  
- No nível das placas de circuito impresso embarcadas dentro da bateria (BMS)
  1. Proteção contra corrente de carga excessiva
  2. Proteção contra corrente de descarga excessiva
  3. Proteção contra descarga abaixo do valor mínimo de tensão
  4. Balanceamento das baterias
  5. Proteção contra temperaturas excessivas
  
- No nível do equipamento que utiliza as baterias
  1. Medida da tensão e corrente da bateria com desligamento da carga em caso de pane
  2. Medida da temperatura com desligamento da carga em caso de pane.
  3. Proteções contra surtos de tensão provenientes da rede elétrica que alimenta o equipamento.

Dependendo do tipo de célula, baterias de lítio íon podem ser surpreendentemente robustas ou incrivelmente frágeis. Células cilíndricas são geralmente bastante fortes devido à sua caixa de metal. Apesar disso, as baterias não deveriam ser deixadas sem uma proteção adequada, como um estojo plástico para evitar curto-circuito. Baterias prismáticas normalmente também são bastante robustas, devendo-se apenas tomar cuidados para evitar curto-circuito.

Porém as células de lítio-íon polímero, precisam ser manuseadas com cuidado. Não têm qualquer proteção contra serem cortadas, esmagadas, dobradas ou rasgadas. Elas também geralmente têm seus terminais positivos e negativos do mesmo lado da célula, tornando-se perigosamente fácil de colocá-los em curto-circuito.

Para resumir, as células da bateria de lítio-íon são inerentemente perigosas. Elas contêm uma grande quantidade de energia em uma embalagem pequena e são projetadas para fornecer essa energia rapidamente. Mas usando as devidas precauções e princípios de funcionamento seguros, as células são tão seguras quanto possível para nossos usos normais.

De fato, as baterias de Lítio-íon contêm vários componentes que podem, em condições específicas, reagir e gerar calor ou chamas.

Os componentes utilizados em uma célula de lítio-íon são completamente estáveis até 80°C.

As temperaturas de baterias de lítio-íon nunca devem exceder 130°C. Uma temperatura ligeiramente superior a 130°C, faz com que o eletrólito nas células se oxide a uma taxa que cria tanto calor que causa aumento na taxa de oxidação o que por sua vez causa mais aumento de temperatura e a bateria irá queimar até se consumir. Esse fenômeno é conhecido como fuga térmica.

A temperatura na qual a fuga térmica começa varia de uma célula para outra. Células de lítio cobalto podem entrar em fuga térmica em temperaturas como 150°C, enquanto as células NMC geralmente atingem a fuga térmica perto de 180°C. Ambos os produtos químicos podem atingir temperaturas de mais de 500°C no pico da fuga térmica.

O aparecimento de fuga térmica varia muito em baterias de  $\text{LiFePO}_4$ , mas usualmente começa em torno de 200°C.

O efeito físico sobre as células em grande parte depende do tipo de célula. Células cilíndricas como a 18650 possuem um mecanismo de ventilação sobre o terminal positivo da célula que permite que o gás de escape quando a célula superaquece e se aproxima da fuga térmica.

Algumas células prismáticas têm mecanismos de ventilação. Outras células prismáticas e todas as células tipo cartucho não incluem válvulas de ventilação e não terão nenhuma maneira de liberar o acúmulo de pressão na célula.

Se a pressão interna aumenta, a parede da célula pode romper-se, muitas vezes violentamente, liberando gases altamente inflamáveis, incluindo o gás hidrogênio, metano e etileno.

É raro que uma bateria de lítio-íon atinja o ponto de fuga térmica durante a sua utilização normal.

O maior risco de fuga térmica é quando se usa baterias de lítio-íon sob grandes cargas que resultam em uma corrente elevada. Se a corrente for maior do que a célula pode manipular, ela começará a aquecer. Se continuar assim por muito

tempo, a célula pode alcançar a fuga térmica. Por esta razão, é sempre importante operar a bateria de lítio-íon dentro das especificações de projeto das células.

Esta também é a razão pela qual é recomendável proteger as baterias de lítio-íon de qualquer fonte de calor.

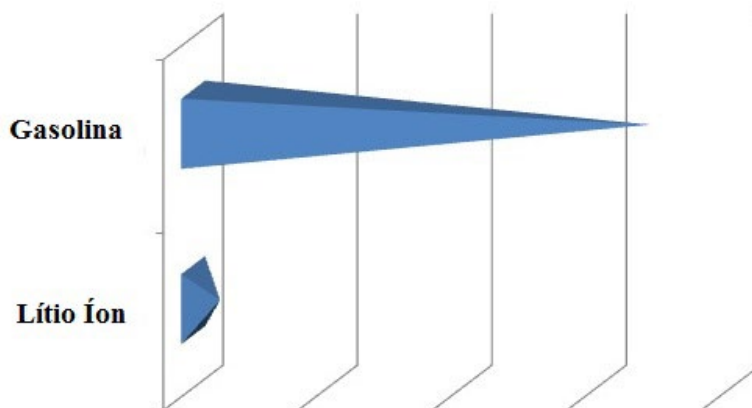
As principais consequências do vazamento são a emissão de calor e gás que é inflamável. O design das células e das baterias geralmente integram proteções (como ventilações) para liberar gás sem criar um risco de estourar as células ou baterias.

Do mesmo modo, plásticos não inflamáveis são usados para não gerarem mais calor com sua combustão. O gás emitido contém monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), bem como vestígios de fluoreto de hidrogênio (HF).

Dependendo da temperatura de emissão de gás e das condições de contato com o ar, o gás pode auto inflamar no ar, adicionando a energia térmica desse processo de combustão adicional ao vazamento térmico. A ignição e a combustão do gás serão evitadas quando, a temperatura dos gases de escape permanecer abaixo de 350 a 400°C.

Para efeito comparativo, a energia de combustão (KJ/Kg) de uma bateria Lítio-íon é 17 vezes menor do que a gasolina. Mesmo sendo muito menos inflamável que a gasolina, ainda assim as baterias de Lítio-íon podem provocar riscos.

Esse tipo de informação é útil para conscientização dos riscos associados à utilização das baterias lítio-íon.



**Figura 101 - Comparação da energia de combustão (KJ/Kg)**

Os riscos potenciais podem não representar o mesmo risco para o usuário, dependendo da aplicação: por exemplo a emissões de gases podem ser consideradas muito perigosas em áreas confinadas como carros, casas etc., mas não em espaços abertos remotos como fazendas solares, por exemplo.

## 15.2 Dispositivos de proteção integrados às células

As baterias podem liberar altas energias e os requisitos de segurança para baterias e células à base de níquel e lítio para aplicações portáteis devem estar de acordo com a IEC 62133.

A norma entrou em vigor em 2012 para reduzir o risco global no transporte, armazenamento e operação de baterias.

As baterias que usam lítio-íon requerem um circuito de proteção obrigatório para garantir a segurança sob quase todas as circunstâncias.

De acordo com a IEC 62133, a segurança das células ou baterias de lítio-íon começa incluindo algumas ou todas as seguintes salvaguardas: PTC, CID, Placa eletrônica PCM e válvula de pressão.

A Figura 102 ilustra a parte superior de uma célula 18650 de lítio-íon com recursos de segurança integrados à própria célula.

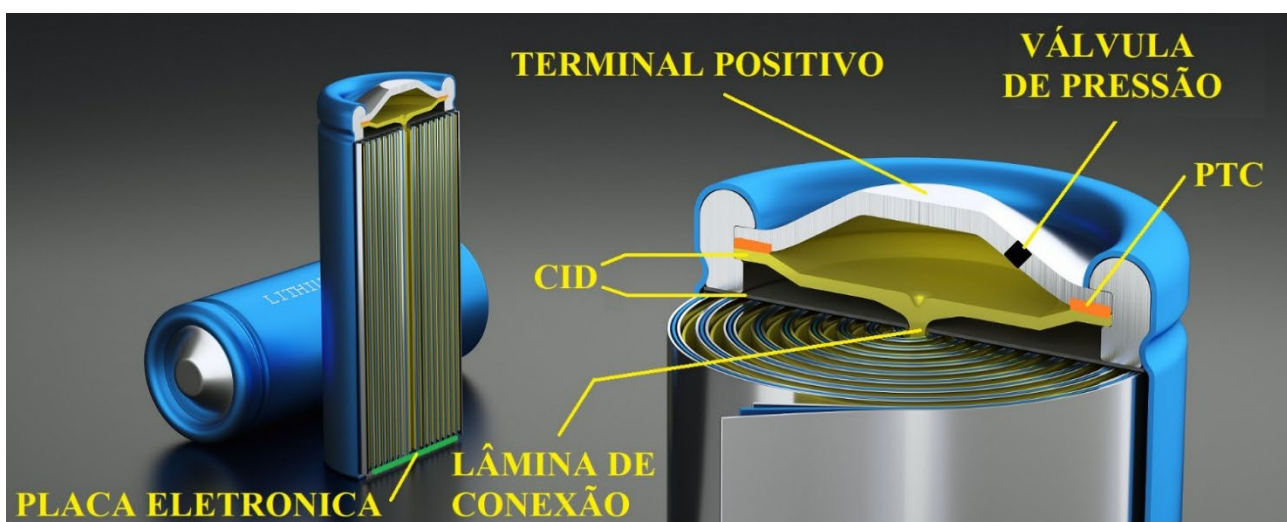


Figura 102 – Topo de uma bateria 18650 de lítio-íon

- **PTC (termistor)**

Também chamado de dispositivo termistor reutilizável, ou "polyswitches" são componentes comuns dentro de células comerciais (por exemplo, parte do conjunto de tampa de 18650 células comerciais) ou em packs de baterias nas conexões entre células.

Esses dispositivos incluem uma camada polimérica condutora que se torna muito resistiva acima de alguma temperatura limite.

Os dispositivos PTC são selecionados para permanecerem condutores dentro das condições especificadas de corrente e temperatura.

No entanto, se a corrente de descarga (ou carga) se tornar excessiva, o polímero aquecerá e se tornará altamente resistivo, reduzindo bastante a corrente de (para) a célula.

Uma vez que o dispositivo PTC esfria, ele novamente se torna condutor.

Os dispositivos PTC podem não ser aplicáveis a células de alta corrente (por exemplo, células de ferramentas elétricas) ou baterias compostas por muitas células conectadas em paralelo.

- **CID (dispositivo de interrupção de corrente)**

Como a sobrecarga leva à fuga térmica em células de íons de lítio, muitos projetos de célula incluem mecanismos internos para evitar sobrecarga.

Sobrecarga excessiva pode levar à geração significativa de gás dentro de uma célula antes da célula entrar em uma condição de fuga térmica.

Em células com formatos prismáticos, e particularmente em células de lítio polímero que tem invólucros externos bastante finos, a geração de gás dentro da célula resultará em inchaço celular e pode forçar a separação dos eletrodos, reduzindo efetivamente a transferência de íons e interrompendo a corrente.

Esse processo pode impedir a fuga térmica das células, mas nem sempre é eficaz.

A geometria das células cilíndricas impede a separação dos eletrodos se ocorrer a geração de gás. Por essa razão, os projetistas de células desenvolveram dispositivos mecânicos de interrupção de corrente (CIDs) para células cilíndricas.

O dispositivo de interrupção de corrente (CID) é um dispositivo do tipo fusível que corta o circuito elétrico permanentemente quando acionado por pressão excessiva da célula, alta temperatura ou alta tensão, dependendo do projeto. Na Figura 102, o CID opera por pressão.

Quando a pressão interna excede determinado valor (1.000kPa - 150psi), o disco superior quebra, se separa da lâmina de conexão metálica e desconecta a corrente da célula. Isso também permite que o gás seja liberado.

Na ativação, os CIDs desconectam física e irreversivelmente a célula do circuito. Embora os CIDs sejam geralmente descritos como dispositivos de proteção contra sobrecarga, eles serão ativados se algo fizer com que a pressão interna da célula exceda o limite de ativação.

Isso pode incluir sobrecarga, superaquecimento celular, problemas nos componentes químicos da célula, curto-circuito interno leve e / ou descarga excessiva de células.

O projeto e a instalação adequados são necessários para uma operação confiável dos CIDs.

Os CIDs também devem ser específicos para cada química das células, para que as condições de sobrecarga resultem em geração de gás suficiente antes da fuga térmica para ativar o CID.

Se um CID não for específico para uma determinada química de célula, sobrecarga de corrente baixa ou correntes muito altas podem não ativar um CID com antecedência suficiente para evitar a fuga térmica da célula.

Devido ao seu design, os CIDs tradicionais podem não ser aplicáveis a células de taxa C muito alta, como as usadas em ferramentas elétricas, porque o design tradicional do CID não permitirá a transferência de correntes muito altas.

Além disso, os CIDs podem não ser apropriados para aplicação em grandes packs de baterias com muitas células em ligação paralela.

Em packs de baterias de 2 ou 3 células em paralelo, os CIDs geralmente funcionam como esperado e impedem uma falha nas células.

No entanto, é improvável que todos os CIDs em um grande pack de baterias com muitas células ligadas em paralelo sejam ativados simultaneamente; em vez disso, a ativação do CID ocorrerá em cascata, causando a aplicação de altas correntes excessivas nas células nas quais os CIDs não foram ativados.

A rápida aplicação de altas correntes pode levar as células à fuga térmica antes que seus CIDs possam ser ativados.

#### ▪ **Placa Eletrônica PCM**

Sistemas de gerenciamento de bateria (BMS), ou como são menos comumente conhecidos, módulos de circuito de proteção (PCMs) ou placas de circuito de proteção (PCB), são circuitos que devem ser adicionados a uma bateria de lítio-íon para proteger a saúde das células individuais na bateria e prolongar a sua vida útil.

Essas placas eletrônicas podem ser colocadas dentro de cada célula ou colocadas externamente, uma placa para cada pack de baterias.

Placas PCM controlam a carga e a descarga das baterias, otimizando sua utilização para aumentar a sua eficiência, segurança e vida útil.

A maioria das células encontradas no mercado não possuem placa PCM interna. As placas mais básicas têm pelo menos as seguintes funções:

#### ▪ **Proteção contra sobre tensão na carga**

Para garantir o uso seguro, as células de lítio-íon devem operar dentro de parâmetros de tensão muito rigorosos.

Dependendo do fabricante e da composição química da célula, esse parâmetro de tensão máxima varia na carga entre 4,2 V por célula e 4,25 V por célula.

A placa PCM monitora esses parâmetros de tensão e se forem excedidos, providencia a desconexão da bateria da carga ou do carregador.

- **Proteção contra subtensão na descarga**

Para garantir o uso seguro, as células de lítio-íon nunca devem ser descarregadas abaixo da sua tensão mínima. Dependendo do fabricante e da composição química da célula, esse parâmetro de tensão mínima varia na descarga entre 3,0 V e 2,5 V por célula.

A placa PCM monitora esses parâmetros de tensão e se forem excedidos, providencia a desconexão da bateria da carga ou do carregador.

- **Proteção contra sobre corrente na descarga**

A placa monitora a corrente de descarga. Se essa corrente excede o valor especificado a placa interrompe o processo de descarga.

- **Proteção contra inversão de polaridade**

Se a polaridade do carregador for invertida, a placa BMS interrompe o processo de carga.

Além dessas especificações mínimas existem placas BMS bem complexas que executam muitas outras funções de proteção:

- **Proteção contra sobre corrente na descarga**

A corrente de carga não deve ser muito alta, normalmente abaixo de 0,7C.

- **Válvula de Pressão**

A válvula de segurança libera gases em acúmulo de pressão excessiva a 3.000kPa (450psi). O último dispositivo de segurança é a válvula de pressão que libera gás durante uma anomalia e pode ser selada novamente.

No entanto, a pressão de uma célula em desintegração pode ser tão grande que os gases são incapazes de escapar de maneira ordenada e ocorre a emissão de chamas.

**Importante:** Nem todas as células possuem proteções integradas e a responsabilidade pela segurança, na sua ausência, cabe ao sistema de gerenciamento de bateria (BMS), externo à célula.

### **15.3 Dispositivos de proteção externos à célula**

Além das salvaguardas internas na célula, um circuito de proteção eletrônico externo impede que qualquer célula exceda 4,30V sob carga. No capítulo 7 descrevemos esses circuitos de proteção em detalhe.

Além disso, esse circuito externo de proteção pode cortar a corrente se a temperatura da superfície de qualquer célula se aproximar de 90°C. Para evitar que a bateria se descarregue abaixo da tensão mínima, o circuito de controle corta a corrente em cerca de 2,20V/célula.

No caso de packs de baterias onde várias células são conectadas em série, cada célula precisa de monitoramento de tensão independente. Quanto maior a quantidade de células, mais complexo é o circuito de proteção.

Existem no mercado circuitos de proteção para packs de baterias que vão desde uma única célula até várias dezenas de células ligadas em série.

Para aplicações especiais, como o veículo híbrido ou elétrico que entrega várias centenas de volts, circuitos especiais de proteção são necessários.

A monitorização de duas ou mais células em paralelo para obter uma corrente mais elevada é menos crítica do que o controle da tensão numa configuração em série.

Os circuitos de proteção só podem proteger contra problemas externos à bateria tais como carregador com defeito, carregador inadequado ou de baixa qualidade, curto-circuito na carga ou carga excessiva.

Se, no entanto, ocorrer um defeito dentro da célula, o circuito de proteção externo tem pouco efeito e não pode deter a reação.

Por isso é importante sempre comprar baterias de boa procedência mesmo pagando um pouco mais caro. Separadores reforçados tornam as baterias mais seguras, porém também as torna mais caras.

É também importante usar carregadores confiáveis que controlam com precisão o encerramento da carga da bateria.

Carregadores baratos normalmente possuem circuitos eletrônicos simplificados de baixo custo, mas que muitas vezes fazem com que a bateria seja sobrecarregada. Neste caso coloca-se toda a responsabilidade da segurança em cima dos circuitos de proteção da bateria e da própria bateria.

É preciso que considerar que os circuitos de proteção, são dispositivos eletrônicos que também podem falhar. Quando falamos em segurança, é importante lembrar que redundância é fundamental e por isso é necessário o uso de carregadores adequados.

Preços baixos tornam os produtos atraentes, mas os padrões de segurança não são iguais aos dos produtos de marca. Não é um bom negócio economizar dinheiro, comprando baterias de procedência duvidosa.

Deve-se desconfiar de baterias de baixo custo. Nesses casos ou a quantidade de energia da bateria não é aquela indicada em seu rótulo ou então a segurança não é adequada. Em ambos os casos o consumidor acaba sendo lesado.

## **15.4 Tipos de falhas nas baterias de lítio íon**

O fato de que as baterias podem falhar em raras ocasiões de maneira descontrolada trouxe uma conscientização pública maior para a segurança das baterias, em particular como resultado de alguns recalls muito grandes de produtos de baterias de notebooks e telefones celulares.

As falhas das células de lítio-íon podem ocorrer por várias razões, incluindo: projeto inadequado das células (eletroquímico ou mecânico), falhas na fabricação das células, abuso externo de células (térmicas, mecânicas ou elétricas), falhas de projeto ou de fabricação da bateria, projeto ou fabricação de componentes eletrônicos de proteção deficiente e projeto ou fabricação de carregador ou sistema inadequado.

Assim, a confiabilidade e a segurança da bateria de lítio-íon depende de vários fatores.

As falhas que ocorrem no campo raramente estão relacionadas ao design da célula, mas são predominantemente o resultado de defeitos de fabricação ou cenários de abuso que resultam no desenvolvimento de falhas internas da célula.

As baterias de íon de lítio podem apresentar dois tipos de falhas:

- Falhas não energéticas
- Falhas energéticas.

### **15.4.1 Falhas não energéticas**

Os modos típicos de falha não energética, geralmente consideradas falhas benignas incluem perda de capacidade, aumento da impedância interna, ativação de um mecanismo permanente de desativação, como CID, vazamento de eletrólito e subsequente ressecamento celular e inchaço celular.

Alguns desses modos de falha não energética são comumente associados aos mecanismos de envelhecimento celular

- **Perda de Capacidade e aumento na resistência interna**

O modo ideal de falha da bateria de lítio-íon é a perda lenta de capacidade e o aumento da impedância interna causada pelo envelhecimento normal das células. Se uma célula exibir esse modo de falha, a capacidade diminuirá e a

impedância aumentará até o ponto em que a bateria não puder mais atender aos requisitos de energia do dispositivo e deverá ser substituída.

A maior parte das baterias de lítio-íon no campo sofre esse tipo de falha.

- **Vazamento de Eletrólitos**

Outra questão importante relativa à segurança das baterias é o vazamento. Baterias armazenadas por longo tempo, de baixa qualidade ou usadas em condições inadequadas podem vaziar substâncias químicas perigosas.

O vazamento de eletrólitos pode ocorrer como resultado de danos mecânicos às células ou devido à corrosão interna das células.

O derramamento provoca riscos ligados às propriedades corrosivas e inflamáveis do eletrólito. A emissão de gás provoca risco associado às propriedades inflamáveis de substâncias orgânicas voláteis. Os riscos químicos associados à exposição direta às substâncias contidas na bateria são expostos na ficha de dados de segurança das substâncias.

O vazamento de células de lítio polímero é mais comum do que o vazamento de células que tem invólucros metálicos, como as baterias cilíndricas.

Os selos das células de lítio polímero são mais delicados e falhas nas bolsas dessas células podem resultar em corrosão da bolsa. Nas células pequenas, há muito pouco eletrólito livre: é absorvido principalmente pelo material ativo. É improvável que a punção de uma célula pequena resulte em fuga de mais do que algumas gotas de eletrólito. No entanto, em alguns modelos de células de grande formato, há uma quantidade apreciável de eletrólito líquido livre dentro do compartimento da célula.

Para essas células, uma punção pode causar um derramamento de material perigoso. O tamanho do derramamento depende do volume de eletrólito contido em uma célula, o tamanho da punção e a taxa de evaporação do solvente do eletrólito. O vazamento de eletrólitos apresenta dois riscos potenciais à segurança: contato humano com os eletrólitos e com os resíduos de eletrólitos e curto-circuito dos sistemas eletrônicos nas proximidades da bateria.

Um aumento da pressão interna nas células de lítio-íon causará inchaço (figura 100). O inchaço pode ser causado por uma variedade de reações químicas não ideais, incluindo: sobrecarga, envelhecimento em temperatura elevada e intrusão de umidade.

O inchaço das células de lítio-íon torna menos provável que uma célula entre em fuga térmica, devido ao afastamento dos eletrodos, mas também pode resultar em vazamentos acentuados de substâncias químicas. O inchaço geralmente resulta em danos aos compartimentos da bateria.

Os projetos de células e baterias geralmente incluem mecanismos para desativar permanentemente as células ou baterias se seu desempenho diminuir

significativamente; forçando assim uma falha segura ao invés de uma reação térmica descontrolada. Mas de qualquer forma baterias superaquecidas ou abauladas são sinais iniciais de mau funcionamento. Em alguns casos pode ocorrer explosão e mesmo fogo, podendo causar danos às pessoas próximas. É preciso cuidado. Como qualquer sistema de bateria, a tecnologia lítio-íon associa riscos elétricos e riscos químicos. Dependendo das condições de estresse ambiental, eles podem eventualmente criar mais ou menos perigo.

- **Desativação da célula**

No nível da célula, os CIDs podem ser ativados por temperaturas elevadas ou pressões elevadas associadas ao aumento da impedância interna e desativar permanentemente a célula.

O envelhecimento anormal de uma célula prismática ou de polímero pode fazer com que a célula inche, separando os eletrodos de modo que a operação continuada se torne impossível.

Em packs de baterias com muitas células conectadas em série, as tensões individuais dos elementos em série são medidas e a carga e a descarga são encerradas com base na tensão do elemento de série mais fraco (menor capacidade, maior impedância).

Assim, um único elemento em série com idade anormal (por exemplo, um bloco de células que é exposto a temperaturas mais altas que as células vizinhas) causará capacidade reduzida de todo o pack de baterias. Esse comportamento da bateria pode forçar a desativação da bateria. Como alternativa, o projeto do pack de baterias deve incluir uma placa PCM com detecção de desbalanceamento das células.

## **15.4.2 Fuga térmica**

A fuga térmica da célula refere-se ao auto aquecimento rápido de uma célula derivada da reação química exotérmica do eletrodo positivo altamente oxidante e do eletrodo negativo altamente redutor.

Isso pode ocorrer com baterias de quase qualquer substância química. Em uma reação descontrolada térmica, uma célula libera rapidamente sua energia armazenada. Quanto mais energia uma célula armazena, mais energética será a reação térmica descontrolada.

Uma das razões pelas quais as reações térmicas das células de lítio-íon podem liberar muita energia é que essas células possuem densidades de energia muito alta em comparação com outras químicas celulares. A outra razão pela qual as reações de fuga térmicas das células de lítio íon podem ser muito energéticas é porque essas células contêm eletrólito inflamável e, assim, elas não apenas armazenam energia elétrica na forma de energia potencial química, mas também

armazenam energia química apreciável (especialmente em comparação com células com eletrólitos à base de água) na forma de materiais combustíveis.

Para o início da fuga térmica da célula (ou ignição de combustível), a taxa de geração de calor deve exceder a taxa de perda de calor. Como discutido acima, o auto aquecimento dos ânodos grafiticos das baterias de lítio-íon na presença de eletrólito inicia-se a temperaturas na faixa de 70 a 90°C.

Assim, se uma célula é levada a essa temperatura inicial em um ambiente adiabático, ela eventualmente se auto aquece até o ponto em que a fuga térmica começa.

Para uma célula 18650 típica, totalmente carregada, levada à sua temperatura de auto aquecimento, a fuga térmica ocorrerá após aproximadamente dois dias se a célula estiver bem isolada. Se a temperatura inicial for mais alta, o tempo para a fuga térmica será menor.

Por exemplo, se uma célula típica de lítio-íon for colocada em um forno a mais de 150°C, de modo que ocorra a fusão do separador, ocorrerá um aquecimento adicional devido ao curto-circuito entre os eletrodos e a fuga térmica da célula será iniciada em minutos.

No entanto, se for permitido que o calor escape, o tempo para a fuga térmica pode ser mais longo ou mesmo a célula nunca poderá alcançar a fuga térmica.

Os padrões estabelecidos pela UL exigem que as células totalmente carregadas suportem armazenamento prolongado a 70 ou 75°C por quatro horas ou mais e condições de curta exposição durante dez minutos a 130°C. Os padrões IEEE requerem armazenamento a 130°C por uma hora.

A gravidade de uma fuga térmica em uma célula de lítio-íon dependerá de vários fatores, incluindo o estado de carga, a temperatura ambiente, o projeto eletroquímico da célula e as características mecânicas da célula tais como o tamanho, o volume de eletrólitos etc.

Para qualquer célula, a reação de fuga térmica será mais grave quando essa célula estiver completamente carregada. Se uma célula típica de lítio totalmente carregada (ou sobrecarregada) sofre uma reação descontrolada térmica, várias coisas ocorrem.

- **Aumento na temperatura interna da célula**

Para células totalmente carregadas, essas temperaturas podem atingir mais de 600°C. Para baterias de LiFePO<sub>4</sub> as temperaturas das células são geralmente mais baixas. O aumento da temperatura é impulsionado por reações dos eletrodos com eletrólito e liberação de energia armazenada.

Alguns materiais catódicos se decompõem e podem alterar sua estrutura cristalina. Essa alteração estrutural pode resultar na liberação de pequenas quantidades de oxigênio que podem participar de reações internas à célula como por exemplo, oxidação do coletor de corrente de alumínio.

Esse fato levou a um equívoco de que as células de lítio-íon queimam vigorosamente porque produzem seu próprio oxigênio. Esta ideia está incorreta. Nenhuma quantidade significativa de oxigênio é encontrada nos gases de ventilação da célula.

Qualquer produção interna de oxigênio afetará a reatividade interna da célula, a temperatura interna da célula e a temperatura do invólucro da célula, mas não desempenha nenhum papel mensurável na inflamabilidade dos gases de ventilação.

O aumento da temperatura interna resulta na fusão e decomposição do separador e, geralmente, no coletor de corrente de alumínio, que ocorre a 660°C.

O alumínio líquido pode ligar-se a qualquer cobre exposto dentro da célula. Algumas ligas de cobre e alumínio têm pontos de fusão tão baixos quanto 548°C; portanto, é provável que ocorram danos aos coletores internos de corrente de cobre.

As temperaturas produzidas pelas reações de fuga térmicas das células são consideradas suficientes para causar a ignição na superfície quente de misturas inflamáveis, mas não atingem níveis que causem o derretimento de cobre puro (1.080°C), níquel ou aço.

- **Aumento na pressão interna da célula**

Isso ocorre porque o eletrólito aquecido vaporiza e se decompõe, e alguns materiais catódicos também podem se decompor, liberando gás.

Em uma bolsa ou célula prismática, isso resultará em inchaço celular. Para um projeto cilíndrico típico, não ocorrerá um inchamento acentuado.

No entanto, se uma célula cilíndrica tiver sido suficientemente aquecida, geralmente de uma fonte externa, as paredes da caixa podem amolecer o suficiente para permitir o abaulamento da base da célula.

- **Ventilação da célula**

Entende-se por ventilação da célula a liberação de gases decorrentes das reações químicas internas. Em uma célula de lítio polímero que tem invólucro externo (bolsa) bastante frágil se comparado às células cilíndricas, as vedações falham a temperaturas razoavelmente baixas, resultando em ventilação de baixa pressão.

As células ficam estufadas (figura 100) e se a produção interna de gases for acentuada pode haver o rompimento da bolsa, muitas vezes produzindo um som audível.

As baterias de lítio-íon cilíndricas normalmente tem uma válvula que permite a ventilação da célula.

As baterias de lítio-íon prismáticas podem ter uma válvula de ventilação instalada, usualmente em células de grande tamanho ou podem incorporar pontos fracos no seu invólucro metálico que permitem a ventilação caso necessário.

A ventilação de pequenas células prismáticas é geralmente acompanhada por um estalo alto.

Em pequenas aplicações de célula única, como por exemplo telefones celulares, a ventilação geralmente faz com que a célula seja ejetada do dispositivo.

### **15.4.3 Falhas energéticas**

Existem várias maneiras de exceder os limites de estabilidade térmica de uma célula de lítio-íon e causar uma falha energética, que provoca a fuga térmica na célula.

As falhas energéticas da bateria de lítio íon podem ser induzidas por forças externas, como exposição ao fogo ou danos mecânicos graves.

Ou podem ser o resultado de problemas que envolvem projeto e implementação de circuitos de proteção de carga e descarga, ou podem ser causados por falhas internas nas células que resultam de problemas de fabricação que são bastante raros.

Geralmente, as causas principais das falhas energéticas das células e dos packs de baterias podem ser classificadas em:

1. Abuso térmico;
2. Abuso mecânico;
3. Abuso elétrico;
4. Defeitos de fabricação das células.

#### **15.4.3.1 Abuso térmico**

A maneira mais direta de exceder os limites de estabilidade térmica de uma célula de lítio-íon é submetê-la ao aquecimento externo.

O calor externo pode ser aplicado à maior parte da célula ou pode ser localizado em um ponto da célula, causando reações locais que se propagam para toda a célula.

Esse tipo de falha é muito raro em dispositivos eletrônicos de consumo, pois exigiria o armazenamento da célula a uma temperatura elevada de 70 a 90°C em um ambiente adiabático, altamente isolado e tempos prolongados para alcançar uma condição de fuga térmica autossustentável.

Embora possível essas condições raramente são alcançadas com dispositivos eletrônicos de consumo em campo.

Essas condições de falha podem ser mais prováveis em packs de baterias, muito compactos, de grande tamanho, muito densos, onde a alta densidade de

células pode impedir a remoção de calor das células no centro do pack de baterias e provocar o auto aquecimento a longo prazo.

A falha nesse modo também pode ocorrer em certos cenários extremos de armazenamento.

Alguns exemplos podem incluir baterias de lítio-íon armazenadas em prateleiras altas em armazéns não climatizados durante os meses de verão.

Também baterias expostas ao Sol durante muitas horas ou baterias de lítio-íon armazenadas muito próximas de fontes de calor tais como aquecedores e fornos.

A exposição aguda de uma célula a altas temperaturas por exemplo, devido ao ataque de chamas, exposição a gases de combustão quentes de um incêndio próximo ou contato com células adjacentes submetidas a reações de fuga térmica induzirá prontamente a fuga térmica nessa célula.

Em packs de baterias, se uma falha interna em uma célula for suficiente para causar fuga térmica nessa célula, a transferência de calor da célula com falha causará fuga térmica nas células vizinhas do pack de baterias.

Assim, a reação de fuga térmica se propaga através do pack de baterias.

Por exemplo, uma falha interna de uma célula em um pack de baterias de um notebook resulta primeiro em fuga térmica da célula com falha e pode subsequentemente causar a propagação de reações térmicas por todo o restante das células do pack de baterias.

Ocasionalmente, se a transferência de calor for limitada entre as células, como por exemplo, quando as células estão bem separadas, a fuga térmica não se propaga. Evitar a propagação da fuga térmica das células tem implicações significativas para a supressão e proteção contra incêndio.

Do ponto de vista da proteção contra incêndio, particularmente em áreas de armazenamento a granel, o isolamento (separação térmica) de baterias de lítio-íon umas das outras e de produtos de combustão quente é importante para mitigar e impedir a propagação do fogo após um incidente inicial, como uma única célula em fuga térmica.

#### **15.4.3.2 Abuso mecânico**

O abuso mecânico de células pode causar um curto-circuito entre os eletrodos da célula, levando ao aquecimento localizado da célula que se propaga para toda a célula e inicia a fuga térmica.

O abuso mecânico pode ser grave e resultar em falha imediata, ou pode ser sutil, e criar uma falha na célula que resulta em uma falha interna da célula muito mais tarde ou seja, após a célula ter passado por numerosos ciclos.

Existem normas que estabelecem padrões para a tolerância mínima das células a algumas formas de abuso mecânico grave. Esses padrões exigem que as

células totalmente carregadas suportem esmagamentos de placas planas e esmagamentos com ponteiros perpendiculares às superfícies dos eletrodos.

Os danos mecânicos nas células de lítio-íon, esmagamento ou penetração, podem causar fuga térmica da célula.

Se o invólucro da célula for penetrado por objeto metálico, é provável que ocorra um curto-circuito entre os coletores de corrente.

A conexão dos coletores de corrente da célula pelo objeto metálico perfurante, pode provocar um curto-circuito de baixa impedância e o aquecimento da célula pode ser muito baixo para resultar em fuga térmica da célula. Mas dependendo do local da perfuração, o aquecimento da célula pode ser elevado provocando a fuga térmica.

No entanto, se ocorrer esmagamento é provável que essa deformação resulte em alta impedância de curto-circuito entre as camadas dos eletrodos e inicie a fuga térmica da célula.

A suscetibilidade das células a danos mecânicos graves é um fator muito importante na segurança durante o transporte e manuseio das células. Danos durante o manuseio podem ocorrer de várias maneiras.

Packs de células ou equipamentos que contenham baterias podem ser submetidos a choques severos, isto é, podem ser derrubados, sofrer esmagamentos ou perfurações, causando danos mecânicos às células.

Por isso as embalagens usadas no transporte das células devem ser bastante robustas. Por vezes um dano mecânico leve pode se tornar um ponto de degradação do eletrodo ou do separador ao longo de vários ciclos de trabalho da célula de modo que, durante ou após o carregamento da célula, a célula sofre uma reação descontrolada térmica.

A falha por esse modo, como a maioria das falhas internas de curto-circuito da célula, é mais provável que ocorra durante o carregamento da célula ou imediatamente após o carregamento.

As células de lítio polímero, muito utilizadas em aeromodelos e drones devido ao seu peso leve, são as células mais suscetíveis a danos mecânicos pois possuem invólucro externo que pode ser facilmente ser perfurado ou esmagado. Por isso se deve adotar maiores precauções de segurança ao usar esse tipo de células.

As células e as baterias danificadas mecanicamente devem ser descartadas, e não colocadas novamente em serviço.

Na internet existem muitos vídeos e blogs sugerindo a montagem de packs de baterias pelo método “faça você mesmo” (DIY). Se sugere que as conexões entre as células sejam feitas através da soldagem comum, com ferro de solda e estanho.

Esse tipo de soldagem provoca aquecimento elevado da célula, podendo causar danos mecânicos irreversíveis, principalmente nas baterias que possuem válvulas de ventilação. Nunca se deve soldar as células com ferro de solda.

### **15.4.3.3 Abuso elétrico**

Há várias maneiras pelas quais as células de lítio íon podem ser abusadas eletricamente, levando a reações térmicas das células. Alguns desses mecanismos são descritos abaixo.

### **15.4.3.4 Sobrecarga**

A sobrecarga de uma célula de lítio-íon pode causar degradação significativa do ânodo e do cátodo. No ânodo, a sobrecarga pode causar revestimento, em vez de intercalação de lítio.

O lítio forma dendritos que podem crescer ao longo do tempo e causar curto-circuito interno. O lítio também interage de forma exotérmica com o eletrólito.

No cátodo, a sobrecarga pode causar a remoção excessiva de lítio das estruturas do material do cátodo, de modo que sua estrutura cristalina se torne instável, resultando em uma reação exotérmica.

As reações no ânodo e no cátodo, bem como o curto-circuito do dendrito de lítio, podem empurrar uma célula para fora de seus limites de estabilidade térmica e resultar em uma reação descontrolada térmica.

Quanto mais grave o grau de sobrecarga, maior a probabilidade de ocorrer fuga térmica. Existem algumas maneiras pelas quais uma sobrecarga pode ocorrer.

O modo de sobrecarga mais óbvio é carregar uma célula com tensão muito alta (sobrecarga de sobre tensão). Por exemplo, carregar uma célula com classificação de 4,2V acima de 5V provavelmente causará uma falha energética imediata.

Carregar a célula com correntes excessivas, mas não com voltagens excessivas, também pode causar uma falha de sobrecarga; nesse caso, as regiões localizadas de alta densidade de corrente dentro de uma célula ficarão sobrecarregadas, enquanto outras regiões dentro da célula permanecerão dentro dos limites de tensão apropriados.

Falhas graves de sobrecarga não são comuns em dispositivos eletrônicos de consumo, pois geralmente contêm mecanismos redundantes de proteção contra sobrecarga.

Ocasionalmente, um defeito de projeto ou fabricação pode causar desvio dos mecanismos de proteção e resultar em falhas graves de sobrecarga.

Embora uma sobrecarga severa leve à fuga térmica imediata da célula, uma leve sobrecarga repetida de uma célula pode não causar uma falha por um período prolongado, mas pode resultar em fuga térmica.

#### **15.4.3.5 Curto-circuito externo**

Descarga de alta corrente (ou carregamento) pode causar aquecimento resistivo dentro das células em pontos de alta impedância. Esse aquecimento interno pode fazer com que as células excedam os limites de estabilidade térmica.

Os pontos de alta impedância podem incluir pontos de solda em uma célula ou superfícies do eletrodo. À medida que o tamanho e a capacidade da célula aumentam, também aumenta a probabilidade de aquecimento por impedância interna, levando a fuga térmica.

As células maiores exibem uma transferência de calor mais lenta para o exterior e geralmente têm capacidades mais altas. Assim, eles têm o potencial de converter mais energia elétrica em calor interno.

Os padrões de teste UL fornecem um requisito mínimo para a resistência externa a curto-circuito da célula: descarga através de uma resistência inferior a 0,1 ohm em um ambiente de 55°C.

As regulamentações de remessa internacional e doméstica exigem que as células ou baterias sejam protegidas contra curtos-circuitos.

A investigação de várias falhas térmicas ocorridas durante o transporte revelou que embalagens inadequadas, particularmente falhas na prevenção de curtos-circuitos, são uma causa comum desses incidentes.

#### **15.4.3.6 Excesso de descarga**

Simplesmente descarregar demais uma célula de lítio-íon para 0V não causará uma reação descontrolada térmica.

No entanto, essa descarga excessiva pode causar danos internos aos eletrodos e coletores de corrente particularmente se essa descarga excessiva se repetir várias vezes podendo levar à fuga térmica.

A maioria dos equipamentos eletrônicos de consumo define limites específicos de tensão de descarga para as baterias de lítio-íon, quando a carga elétrica da bateria é desconectada por um interruptor eletrônicos para evitar a descarga excessiva.

Este interruptor é reiniciado após o carregamento. No entanto, esse mecanismo não pode impedir completamente a descarga excessiva.

Por exemplo, uma bateria pode ser descarregada no ponto de corte de baixa tensão e, em seguida, armazenada por um período prolongado, durante o qual a auto descarga da célula acaba por resultar em descarga excessiva.

A maioria dos circuitos eletrônicos de proteção de packs de baterias permitirá a recarga de células com descarga excessiva, apesar da possibilidade de o eletrodo negativo ser danificado.

Portanto, a descarga excessiva pode causar fugas térmicas das células de lítio-íon. Forçar uma célula à inversão de polaridade, carregando-a com tensão de polaridade invertida pode causar fuga térmica.

Os testes UL exigem um requisito mínimo de resistência à descarga excessiva forçada para células usadas em packs multicelulares.

Esses testes foram projetados para simular o mecanismo mais provável de descarga forçada em packs de baterias com várias células ligadas em série.

Essa descarga forçada chegando até a inversão de polaridade pode ocorrer em casos de curto-circuito externo ou então com corrente de descarga muito elevada e uma ou mais células tem capacidade menor do que as células vizinhas.

Uma célula de menor capacidade pode ocorrer devido ao envelhecimento do pack de baterias.

Nesse cenário, o fluxo de corrente das células em série de maior capacidade no pack de baterias levará a célula de menor capacidade para a reversão de tensão.

Por isso é importante incluir componentes eletrônicos de proteção que detectem e desativem o carregamento de uma célula danificada. É possível que uma célula possa repetidamente ser forçada a uma descarga excessiva e, finalmente, sofrer uma reação de fuga térmica.

Os testes de células de lítio-íon geralmente garantem que as células tenham um desempenho adequado quando novas. No entanto, o envelhecimento celular resultará em degradação inesperada de um componente celular, como um dos eletrodos, o separador ou o eletrólito que pode resultar em falhas térmicas.

#### **15.4.3.7 Defeitos de fabricação**

A S.T.A. trabalha com baterias de lítio-íon desde 2010. De acordo com nossa experiência, os eventos relatados nos parágrafos anteriores apesar de serem possíveis são extremamente raros, principalmente para células cilíndricas de boa procedência.

As células de lítio-íon comerciais de fabricantes idôneos são submetidas a rigorosos testes de confiabilidade e segurança, incluindo testes mecânicos e elétricos (simulação de abusos).

Além disso as baterias de equipamentos eletrônicos disponíveis no mercado tais como celulares e notebooks, possuem dispositivos de proteção redundantes para evitar sobrecarga da célula e outras condições potencialmente prejudiciais ou inseguras.

Em packs de baterias com muitas células de lítio-íon se usam várias proteções, descritas em detalhes nos próximos capítulos deste livro. Os invólucros metálicos externos das células cilíndricas são bastante resistentes à perfurações e esmagamentos. Os packs de baterias devem ser projetados para impedir o abuso mecânico, elétrico e térmico. No entanto, falhas de fuga térmica ainda podem

ocorrer e são causadas por falhas internas das células relacionadas a defeitos de fabricação.

Existem inúmeras falhas que podem ocorrer durante a fabricação das células que podem resultar em reações descontroladas térmicas das células. Fundamentalmente, problemas em qualquer etapa do processo de fabricação da célula podem resultar em uma falha interna da célula.

Por exemplo, pode haver defeitos nas matérias-primas das células, defeitos nos revestimentos dos eletrodos, contaminantes introduzidos durante os processos de montagem e componentes extraviados, mal aplicados ou danificados.

Dispositivos de proteção externos não podem proteger contra curtos-circuitos repentinos, porém a detecção do desequilíbrio acentuado na tensão das células de um pack de baterias permite desativar as baterias, impedindo danos significativos.

Uma falha interna da célula resulta em um curto-circuito dentro da célula. Se o ponto de curto-circuito for pequeno (um micro curto), o desligamento do separador, ou seja, o bloqueio físico do transporte de íons de lítio em uma região localizada dentro da célula pode isolar a falha e permitir que a célula continue funcionando normalmente.

Se o ponto de curto-circuito libera energia suficiente, ele pode aquecer a célula além dos limites de estabilidade térmica e causar fuga térmica da célula.

Falhas internas relacionadas a defeitos de fabricação geralmente ocorrem muito cedo na vida de uma célula. Esses tipos de falhas podem ocorrer nas linhas de montagem do fabricante nas quais as células estão sendo carregadas ou nas mãos dos consumidores: um usuário compra um dispositivo, conecta-o à carga e, durante essa primeira carga, as células sofrem fuga térmica.

Essas falhas ocorrem inevitavelmente durante ou imediatamente após o carregamento. Existem algumas razões possíveis para esse fenômeno:

- O carregamento da célula causa alterações dimensionais nos componentes celulares, por exemplo expansão de volume e aumento da pressão no interior da célula. Se um contaminante agudo ou rebarba estiver presente dentro de uma célula, alterações dimensionais ou aumentos de pressão podem fazer com que perfure as camadas separadoras e causar curto-circuito direto.

- O carregamento fornece energia elétrica para a célula, elevando seu estado de carga e aumentando as chances de fugas térmicas.

- O carregamento fornece energia para qualquer ponto de curto-circuito dentro de uma célula. Se um ponto de curto-circuito estava presente em uma célula antes do carregamento, isso pode ter causado a descarga automática da célula antes da geração de calor suficiente para induzir a fuga térmica. No entanto, quando conectado a um carregador, um curto pode consumir energia continuamente até que a fuga térmica seja iniciada.

Existem várias técnicas de controle de qualidade de fabricação que são comumente empregadas para detectar defeitos graves. No entanto, defeitos muito sutis podem deixar de ser notados durante a fabricação e permitir anos de ciclo celular aparentemente normal antes que ocorra uma reação térmica descontrolada.

A gravidade de uma falha nas células de lítio-íon será fortemente afetada pela energia total armazenada nessa célula: uma combinação de energia química e energia elétrica.

Assim, a gravidade de um evento potencial de fuga térmica pode ser atenuada reduzindo a energia química armazenada.

A redução da energia elétrica pode ser feita usando eletrodos de baixa capacidade ou reduzindo o SOC da célula.

Finalmente, alterar o ambiente de transferência de calor de uma célula e, assim, afetar a remoção de energia também pode influenciar a severidade da fuga térmica.

A química das células de lítio-íon pode afetar a gravidade de uma falha da célula. Certos materiais de cátodo permitem densidades de energia mais altas do que outros, e as células produzidas a partir desses materiais de alta densidade de energia estarão sujeitas a reações térmicas mais severas.

As reatividades do material do cátodo são frequentemente examinadas e usadas para comparar a relativa "segurança" do cátodo. Isso pode ser um fator para determinar se uma falha localizada dentro da célula pode causar aquecimento suficiente para levar a célula inteira à fuga térmica.

No entanto, uma vez que uma célula atinge a fuga térmica, a gravidade final da reação é dominada pelo fato de a própria célula atingir temperatura suficiente para inflamar gases de ventilação inflamáveis. A ignição de superfície quente geralmente requer temperaturas bem acima das temperaturas de autoignição do gás - para hidrocarbonetos, geralmente na faixa de 600 a 1.200°C, dependendo da composição e de vários fatores geométricos das superfícies aquecidas.

Assim, se o material do cátodo tiver densidade de energia suficientemente baixa para garantir que uma célula permaneça abaixo de 600 °C durante a fuga térmica, a gravidade da reação da fuga térmica não será afetada significativamente pela química do cátodo.

A aplicação de aditivos retardadores de chama nos eletrólitos celulares e o desenvolvimento de eletrólitos não inflamáveis continuam sendo áreas de estudo ativas.

Observou-se que a grande maioria das reações descontroladas térmicas que ocorrem no campo ocorrem durante ou logo após o carregamento da célula.

Do ponto de vista energético, é improvável que a fuga térmica da célula ocorra em uma célula com um SOC baixo.

Testes mostram que, para muitas células de lítio, mesmo o esmagamento severo de células abaixo de aproximadamente 50% de SOC não levaria a uma reação grave.

O teste de uma variedade de 18650 células à temperatura ambiente demonstrou que abaixo de 50% de SOC, a célula o curto-circuito causará aquecimento nas temperaturas da caixa da célula até aproximadamente 130°C, seguido pelo resfriamento da célula.

Ao testar um modelo comercial de células de óxido de cobalto, os pesquisadores descobriram o início do auto aquecimento a 80°C para células com 100% SOC e a 130°C para células com 0% SOC.

Testes diretos de curto-circuito<sup>111</sup> mostraram que a redução do SOC reduz significativamente a temperatura máxima alcançada no ponto de curto-circuito.

Finalmente, o ambiente de transferência de calor de uma célula submetida a uma reação descontrolada térmica pode desempenhar um papel importante na gravidade da reação.

Altas temperaturas ambientes ou isolamento adiabático aumentam a probabilidade de que qualquer falha interna possa levar uma célula a fuga térmica e aumenta a energia disponível para aquecer a célula.

Por outro lado, se uma célula é cercada por meios condutores térmicos (por exemplo, cercados por células densamente compactadas ou refrigerante), a perda de calor pode impedir ou mitigar uma reação descontrolada térmica. Se as células forem montadas muito próximas e não forem aquecidas o suficiente, a fuga térmica em uma célula poderá se propagar para as células próximas. Vários pesquisadores experimentaram incorporar células em materiais que podem melhorar a transferência de calor para longe das células. Muitos fabricantes limitam as dimensões da célula para garantir que um curto-circuito externo não cause aquecimento interno suficiente para conduzir uma célula para a fuga térmica.

## **15.5 Ciclos de vida de células de lítio íon**

É importante notar que as células de lítio-íon têm um ciclo de vida. O ciclo de vida típico de uma célula de íon de lítio é composto por oito etapas e cada uma dessas etapas apresenta riscos de segurança específicos.

### **1. Fabricação da célula**

As células de lítio-íon são testadas após sua fabricação e nestes testes são detectadas possíveis falhas. Se uma célula contiver um defeito de fabricação que não foi detectado antes do ciclo inicial, há uma alta probabilidade de que o defeito se manifeste durante o ciclo inicial como uma falha típica de mortalidade infantil. O risco decorrente dessas falhas é pequeno; os fabricantes geralmente rejeitam

células que exibem capacidades muito baixas e taxas de autodescarga muito altas após o ciclo inicial.

## **2. Transporte da célula até o fabricante de packs de bateria**

Após a fabricação as células são empacotadas para o transporte para as instalações de montagem de packs de bateria. Os maiores riscos nesta etapa são o curto-circuito das células ou danos mecânicos como perfuração, esmagamento ou choque mecânico. Para minimizar esses riscos é fundamental uma embalagem adequada.

## **3. Fabricação do pack de baterias**

Quando as células chegam a um montador de packs de baterias, elas podem e devem ser testadas antes da montagem. Esses testes podem ser uma mera medida de tensão de circuito aberto para detectar e rejeitar células com altas taxas de autodescarga, uma indicação de uma anomalia de fabricação ou podem incluir a medida da resistência interna.

Células com resistência interna muito mais elevada ou muito mais baixa que a maioria das células similares do mesmo lote ou mesmo com valores bem fora do especificado, não devem ser usadas em packs de baterias. Após a montagem do pack de baterias deve-se medir a tensão em vazio e pelo menos fazer um teste de descarga com a corrente de pico durante alguns minutos.

## **4. Transporte do pack de baterias até o fabricante de equipamento**

Após a produção, os packs de baterias são embalados para transporte aos fabricantes de equipamentos para integração nos produtos. Aqui também nesta etapa são o curto-circuito das células ou danos mecânicos como perfuração, esmagamento ou choque mecânico. Para minimizar esses riscos é fundamental uma embalagem adequada para o pack de baterias.

## **5. O fabricante de equipamento instala a bateria**

Os fabricantes de equipamentos geralmente instalam baterias em seus equipamentos ou as embalam com seus equipamentos. Para produtos complexos e de alto valor, como notebooks, os fabricantes de equipamentos geralmente testam cada dispositivo com a bateria instalada para garantir que a carga e a descarga dentro de seus dispositivos funcionem corretamente e que a bateria também esteja funcionando.

## **6. Transporte do equipamento a um centro de distribuição e ao cliente**

É uma boa medida de segurança enviar produtos com baterias de lítio-íon 50% SOC ou menos e com uma embalagem projetada para proteger o equipamento bem como as baterias que ele contém.

## **7. O cliente usa o dispositivo com sua bateria**

Esta etapa é uma das mais críticas em termos de segurança por duas razões principais. A primeira delas é o desconhecimento por parte do cliente das medidas de segurança para equipamentos com baterias.

Esse risco pode ser minimizado, incluindo junto ao produto um manual onde estejam explicitadas as instruções para operação segura do equipamento.

O segundo risco é o cliente reenviar o equipamento juntamente com a bateria, como por exemplo, um presente, uma devolução do produto ou para reparos e usar uma embalagem inadequada. O uso de embalagens inadequadas pode causar danos mecânicos ou mesmo elétricos à bateria.

Há também o risco aumentado quando o cliente envia o equipamento com a bateria 100% carregada. Existem relatos de incêndios em baterias de lítio-íon durante o transporte onde não foram seguidas as medidas de segurança necessárias, normalmente com a utilização de embalagens inadequadas.

Existe um consenso considerável no setor de que a remessa é segura quando os remetentes cumprem as regulamentações existentes para remessas de baterias de lítio-íon - especificamente as regulamentações para transporte aéreo.

## **8. Final da vida útil da bateria e descarte.**

Ao enviar as baterias para reciclagem ou apenas colocando-as no lixo doméstico, sempre se deve primeiro preparar as células. Baterias de lítio devem ser descarregadas completamente.

Os terminais das células também devem ser envoltos em plástico ou cobertos com fita para evitar um curto-circuito.

O risco de incidentes é aumentado quando o usuário não segue essas recomendações básicas, pois as baterias em fim de vida útil apesar de terem sua capacidade reduzida ainda podem conter energia suficiente para provocar incêndios e explosões, como por exemplo em caso de curto-circuito externo.

Apesar de todos os riscos descritos as baterias de lítio-íon são bastante seguras, se o projeto for bem-feito com a utilização dos vários dispositivos de segurança disponíveis e se a embalagem for adequada.

Os dados que podem ser encontrados no site da FAA (Federal Aviation Administration), Estados Unidos, podem ser usados para estimar uma taxa de falha típica de células de lítio íon no transporte de carga aérea.

Verificando os incidentes documentados pela FAA e considerando que a produção anual de células seja de alguns bilhões de células, parte delas

transportadas por via aérea, pode-se estimar uma taxa de falhas da ordem de 1 em 1 bilhão de células transportadas por avião.

Por outro lado, as falhas de campo das células, ou seja, durante o uso pessoal das baterias tendem a ocorrer com mais frequência principalmente quando as baterias estão totalmente carregadas, mesmo assim estima-se uma taxa de falha de 1 em 1 milhão de células.

O exame dos dados de incidentes disponíveis sugere que os incidentes de carga aérea são causados por danos mecânicos ou curto-circuito externo das células.

Incidentes com baterias pessoais geralmente são causados por falhas internas da célula, muitos deles provocados por mau uso durante a vida útil da bateria, tais como choques mecânicos decorrentes de quedas, curtos-circuitos e exposição da bateria a altas temperaturas (baterias deixadas expostas ao Sol, em painéis de automóveis fechados expostos ao Sol, proximidade de fornos domésticos e aquecedores etc.)

## **15.6 Transporte seguro das baterias de lítio**

Ao enviar qualquer bateria, se deve proteger todos os terminais contra curto-circuito que pode resultar em incêndios.

Proteger os terminais cobrindo-os completamente com material isolante, não condutor (por exemplo, usando fita isolante ou colocando cada bateria isoladamente em um saco plástico), ou embalando cada bateria com embalagem interna totalmente embutida para garantir que os terminais expostos estejam protegidos.

Devem-se embalar as baterias para evitar que elas sejam esmagadas ou danificadas e para evitar que se movam durante o manuseio.

Sempre manter objetos de metal ou outros materiais que possam causar curto-circuito em terminais longe das baterias (por exemplo, usando uma caixa interna separada para as baterias). Para evitar incêndio, qualquer dispositivo que tenha baterias instaladas deve estar desligado durante o transporte.

Proteger botões que possam ser ativados acidentalmente. Mesmo os dispositivos muito simples como lanternas ou furadeiras recarregáveis podem gerar uma quantidade perigosa de calor se ativados acidentalmente.



**Figura 103 – Exemplo de etiqueta para transporte de baterias de lítio-íon**

Para baterias devolvidas ou recicladas, nunca se deve usar serviços aéreos para enviar baterias devolvidas ao fabricante por razões de segurança, pois tais remessas são proibidas pela regulamentação (ou seja, Regulamentações de Mercadorias Perigosas da IATA, Disposição Especial A154).

As regulamentações aplicáveis às baterias de lítio são dinâmicas.

Os remetentes de baterias de lítio devem estar a par das mudanças.

Os documentos de resumos do teste UN38.3 devem ser disponibilizados mediante solicitação: “Fabricantes e os subsequentes distribuidores de células ou baterias fabricadas após 30 de junho de 2003 devem disponibilizar o resumo do teste conforme especificado no Manual UN de Testes e Critérios, Parte III, subseção 38.3, parágrafo 38.3.5”.

Todos os remetentes de baterias de lítio, por meio de transporte aéreo têm a responsabilidade de obedecer às exigências da IATA 3.9.2.6.1(g) conforme 1º de janeiro de 2020.

Isto se aplica a todas as remessas de baterias de íon-lítio e lítio metálico sejam sozinhas, dentro de um equipamento, embrulhadas com o equipamento ou alimentando um veículo.

As baterias de lítio são projetadas para fornecer altos níveis de potência, a energia elétrica dessas baterias é expressiva, o que significa que elas podem, às vezes, gerar uma grande quantidade de calor se estiverem em curto-circuito.

Além disso, o conteúdo químico dessas baterias pode se incendiar caso sejam danificadas, ou projetadas/ montadas inadequadamente. Por estes motivos, existem normas de segurança que controlam o transporte desse tipo de bateria.

Os remetentes devem estar em conformidade com a norma aplicável publicada pela PHMSA e/ou IATA. Embora todas as baterias de lítio sejam classificadas como artigos perigosos (também referidas como mercadorias perigosas), há exceções para baterias pequenas comuns, cujas regras para embarque aéreo são mais simples.

A regulamentação muda de acordo com o tipo de bateria de lítio (íon-lítio ou lítio metálico) que está sendo enviada e se a bateria está embalada com equipamento ou acoplada em algum equipamento.

Atualmente (2020), de acordo com a regulamentação, uma remessa de baterias de lítio-íon requererá o serviço de embarque de mercadorias perigosas de acordo com as seguintes perguntas:

- Há alguma bateria de íon-lítio em sua remessa com mais de 100 Wh ou células de íon-lítio com mais de 20 Wh?
- **SIM**

Há exigência de contrato de mercadorias perigosas. É necessário fornecer embalagem com marcações de acordo com a especificação UN, etiqueta de bateria lítio classe 9, documentos ou declaração de remessa de materiais perigosos. Para mais detalhes, consultar a regulamentação da IATA: <http://www.iata.org/>

- **NÃO**

Você está enviando baterias de lítio acopladas a equipamentos ou embaladas com equipamentos?

- **NÃO**

Há exigência de contrato de embarque de mercadorias perigosas. Consultar o regulamento da IATA na Seção IB UN3480 (≤10 kg de baterias) ou Seção IA (>10 kg). <http://www.iata.org/>

- **SIM**

O peso líquido total das baterias de lítio da sua remessa excede 5 kg?

- **SIM**

Há exigência de contrato de embarque de mercadorias perigosas. Consultar o regulamento da IATA para obter mais detalhes sobre os requisitos de embarque da Seção I UN3481. <http://www.iata.org/>

- **NÃO**

A remessa não precisa ser embarcada como mercadoria perigosa regulamentada. Consultar as regulamentações da IATA para obter informações sobre os requisitos da Seção II UN3481. <http://www.iata.org/>

Todos os pacotes de “Baterias de íon-lítio embaladas com equipamentos”, exigem a marcação de manuseio de bateria de lítio UN3481.

Também marcar o pacote “P.I. 966-II.”

Para as “Baterias de lítio-íon contidas em equipamentos, apresentar marcação de manuseio da bateria de lítio UN3481 em qualquer pacote individual que contenha mais de 4 células ou mais de 2 baterias.

Além disso, marcar qualquer um desses pacotes com “P.I. 967-II.”

Se não houver mais do que quatro células ou duas baterias e não mais do que dois pacotes na remessa, não são necessárias marcações ou etiquetas.

As embalagens para todas as remessas de baterias de lítio “embaladas com o equipamento” devem resistir a teste de queda de 1,2 metros e todas as baterias devem ser embaladas de forma a eliminar a possibilidade de haver curto-circuito ou ativação.

Não usar envelopes ou embalagens flexíveis.

## **15.7 Armazenagem segura**

Células de lítio-íon, packs de baterias e equipamentos que contêm baterias de lítio-íon provavelmente serão armazenados em depósitos nas diversas etapas do ciclo de vida, desde a fabricação, produção de packs de baterias e distribuição.

Por exemplo, as células podem ser armazenadas em armazéns de fabricantes de células, em armazéns distribuidores, em armazéns montadores de packs de baterias e em vários locais intermediários, como entrepostos aduaneiros. As células de lítio-íon projetadas e fabricadas adequadamente têm taxas de autodescarga muito baixas; comumente na faixa de 1 a 5% ao mês.

Quando armazenada a 25°C ou menos, e inicialmente a aproximadamente 50% SOC, pode-se esperar que uma célula de lítio-íon de alta qualidade experimente um crescimento mínimo da impedância interna e permaneça dentro de uma faixa de tensão aceitável por muitos anos.

O armazenamento a temperaturas elevadas e altas tensões (alto SOC) resulta em degradação acelerada dos componentes celulares, resultando em maior impedância interna.

O armazenamento em baixas tensões (SOC baixo) e/ou baixas temperaturas reduz a magnitude do efeito de redução da vida útil e, portanto, parece indicar que o armazenamento em baixas tensões é preferível para maximizar a vida útil das células.

No entanto, a maioria das células de lítio-íon sofre degradação se permanecer em um estado de descarga profunda, com tensão da célula de aproximadamente 1 V: pode ocorrer corrosão dos coletores de corrente de cobre, levando ao rápido crescimento da impedância e, algumas vezes, resultando em fuga térmica da célula ao ser recarregada.

Assim, colocar uma célula descarregada, com aproximadamente 3V em armazenamento, geralmente é desencorajado, pois períodos prolongados de armazenamento podem resultar em descarga excessiva da célula.

Com base nesses fatores, os fabricantes de células de lítio-íon determinaram que entregar células com aproximadamente 50% de SOC é ideal para maximizar o desempenho das células após o recebimento pelo cliente; a tensão reduzida da célula reduz os efeitos do envelhecimento com o tempo, enquanto a capacidade restante na célula evita a descarga excessiva da célula por períodos significativos.

Além disso, os consumidores podem encontrar comodidade e satisfação ao receber um dispositivo com algumas funcionalidades prontas para uso, sem a necessidade de carregá-lo totalmente antes do primeiro uso.

Packs de baterias e equipamentos que contêm baterias de lítio íon também pode ser armazenados nos locais de revenda. Alguns dos riscos associados aos armazéns são semelhantes aos encontrados durante o transporte. Existe o risco de danos mecânicos devido ao manuseio inadequado, como caixas ou paletes que caem ou são danificados por acidentes com empilhadeiras.

Danos causados por esmagamento ou perfuração nas células ou nas baterias podem levar à liberação de eletrólitos, curto-circuito e possivelmente fuga térmica da célula que pode resultar em incêndio.

Também existe o potencial de aquecimento externo das células devido a um incêndio inicialmente não relacionado às baterias de lítio que, em última análise, resulta em ventilação ou fuga térmica das células.

O armazenamento com SOC reduzido reduz a probabilidade de esmagamento, perfuração ou aquecimento externo levar a fuga térmica da célula e um incêndio gerado por caixas de células aquecidas.

No entanto, se o eletrólito é liberado ou as células são liberadas, os gases liberados apresentam risco potencial de toxicidade e inflamabilidade/explosão.

Se as células não estiverem sendo carregadas enquanto estão armazenadas ou sendo manipuladas, a probabilidade de ocorrência de fuga térmica espontânea das células é muito baixa, principalmente se as células forem armazenadas com SOC reduzido.

No entanto, é provável que o carregamento da bateria ocorra em algumas instalações de armazenamento, particularmente em instalações onde as baterias descarregadas são carregadas em preparação para instalação em veículos.

Como discutido anteriormente, embora as reações de fuga térmica das células sejam raras, no campo, é mais provável que ocorram durante o carregamento ou imediatamente após o carregamento da bateria.

## **15.8 Normas de segurança**

Para baterias de lítio-íon existem entidades dos EUA e suas contrapartes europeias. O Japão tem seus próprios padrões, assim como outras partes do mundo. Os fabricantes de equipamentos geralmente têm padrões e especificações internas adicionais que eles aplicam para proteger melhor sua marca e seus consumidores. Alguns regulamentos são requisitos obrigatórios, enquanto outros são diretrizes, e alguns não são obrigatórios, mas são essencialmente necessários se a empresa quiser vender seu produto a um varejista ou fabricante de dispositivos que exija a segurança de todos os componentes de dispositivos.

Para células de lítio-íon, há três normas que são utilizadas com mais frequência:

- UN 38.3 - Recomendações sobre o transporte de mercadorias perigosas
- IEC 62133 - Requisitos de segurança para células de lítio secundárias seladas portáteis e para baterias feitas a partir delas, para uso em aplicações portáteis
- UL 2054 - Baterias domésticas e comerciais

A seguir, é apresentada uma rápida visão geral de cada um.

- **UN 38.3**

Antes que as células / baterias de lítio possam ser transportadas principalmente por via aérea, elas devem ter passado com êxito em determinados testes. Esses testes simulam condições de transporte como pressão, temperatura, esmagamento, impacto etc. Esses testes são descritos no manual das Nações Unidas ONU chamado "Manual das Nações Unidas de testes e critérios". A Parte III deste manual descreve na subseção 38.3 os 8 módulos de teste que em alguns documentos ou folhas de dados também são chamados de teste T.1 a T.8. Encontrado nos regulamentos de remessa de mercadorias perigosas de muitos países, esse padrão é relevante para a segurança de transporte de todas as células e baterias de metal de lítio e íon de lítio. A UN 38.3 é um padrão de auto certificação, mas devido a possíveis problemas de responsabilidade, a maioria das empresas escolhe usar um laboratório de teste de terceiros. A UN 38.3 apresenta uma combinação de tensões ambientais, mecânicas e elétricas significativas, em sequência:

- T1 - Simulação de altitude (células e baterias primárias e secundárias)
- T2 - Teste Térmico (Pilhas e Pilhas Primárias e Secundárias)
- T3 - Vibração (pilhas e baterias primárias e secundárias)
- T4 - Choque (células e baterias primárias e secundárias)
- T5 - Curto-circuito externo (células e baterias primárias e Secundárias)
- T6 - Impacto (Células Primárias e Secundárias)
- T7 - Sobrecarga (baterias secundárias)
- T8 - Descarga Forçada (Células Primárias e Secundárias)

- **IEC 62133**

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) A IEC é uma organização de padrões sem fins lucrativos que cria normas internacionais para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas. Os padrões IEC atendem às especificações gerais, de segurança e de transporte. Para baterias de lítio-íon, o principal padrão é a IEC 62133 (Células e baterias secundárias contendo eletrólitos alcalinos ou outros não-ácidos - Requisitos de segurança para células secundárias seladas portáteis e para baterias fabricadas a partir delas, para uso em aplicações portáteis)

A IEC 62133 é o padrão de fato para conformidade internacional. O padrão inclui quatro testes:

- Estresse da Caixa Moldada
- Curto-circuito externo
- Queda livre
- Sobrecarga de Bateria

- **UL 2054**

Underwriters Laboratories (UL) é uma organização independente de certificação de segurança de produtos que, em conjunto com outras organizações e especialistas do setor, publica padrões de segurança baseados em consenso.

É um padrão que envolve aproximadamente o dobro do número de testes encontrados nos requisitos da ONU ou da IEC:

- 7 testes elétricos
- 4 testes mecânicos
- 4 testes de compartimento de bateria
- 1 teste de exposição ao fogo
- 2 testes ambientais

## **15.9 Orientações básicas de segurança**

As orientações básicas de segurança para o uso de baterias lítio-íon são:

- Ter cuidado ao manusear e testar baterias de lítio-íon.
- Não provocar curto-circuito, sobrecarga, esmagamento, queda, mutilação, penetração com objetos estranhos, aplicação de polaridade inversa, exposição a altas temperaturas ou desmontagem de embalagens e células.
- Utilizar apenas células de lítio-íon com um circuito de proteção adequado e um carregador aprovado.
- Proteger o equipamento onde a bateria é utilizada contra surtos de tensão vindos através da rede elétrica.

- Interromper o uso da bateria e / ou do carregador se a temperatura da bateria subir mais de 10°C em uma carga regular.
- O eletrólito é altamente inflamável e a ruptura da bateria pode causar lesões físicas.
- Use extintores específicos para baterias de lítio (com agentes encapsulantes como F-500), extintores Classe D (para baterias de metal-lítio), ou extintores de espuma/pó químico tipo ABC para abafar.
- Derramar água apenas para evitar que o fogo se espalhe.
- Se o fogo de uma bateria de lítio-íon em chamas não puder ser extinto, permitir que a bateria se queime por conta própria de forma controlada e segura.
- Importante: Em caso de ruptura, eletrólito vazando ou qualquer outra causa de exposição ao eletrólito, jogar água imediatamente. Se ocorrer exposição dos olhos, lavá-los por 15 minutos e consultar um médico imediatamente.
- Descartar adequadamente as baterias em fim de vida útil

## Capítulo 16: Segunda Vida

**Second Life:** Estratégias para reaproveitamento de packs em sistemas estacionários

O tópico **Second Life (Segunda Vida)** é fundamental. Ele mostra como extrair valor residual de um pack que não serve mais para sua função original (como e-bikes), baseando-se na integridade das conexões que você aprendeu a diagnosticar na imagem.

### 16.1 Second Life: Estratégias para Reaproveitamento Estacionário

Quando um pack de bateria de alta performance (veículos elétricos ou drones) atinge **80% de sua capacidade original (SoH - State of Health)**, ele é considerado "aposentado" para mobilidade. No entanto, ele ainda possui uma vida útil valiosa para aplicações estacionárias.

#### 1. O que define uma Bateria de Segunda Vida?

- **Perda de Densidade:** A bateria ainda armazena energia, mas não consegue entregar picos de corrente sem sofrer um grande *voltage sag* (queda de tensão).
- **Aplicação Ideal:** Armazenamento de energia solar residencial, onde a descarga é lenta e constante ao longo de várias horas.

#### 2. Processo de Desmonte e Triagem (Remanufatura)

Para reaproveitar um pack, você deve retornar aos fundamentos do **Capítulo 8**:

- **Desmontagem Segura:** Cortar as fitas de níquel com cuidado para não causar curtos.
- **Nova Triagem:** Medir a **Resistência Interna (Ri)** de cada célula. Se a soldagem original foi uma **Solda Queimada** (como na imagem), o terminal da célula pode estar danificado, impedindo sua reutilização.
- **Reagrupamento:** Células que envelheceram juntas devem, preferencialmente, permanecer no mesmo banco de baterias.

#### 3. Conversão para Sistemas Solares (Power Walls)

Packs de e-bikes (36V ou 48V) podem ser combinados para criar grandes bancos de 48V nominais:

- **Vantagem:** O custo por kWh de uma bateria de segunda vida é até **70% menor** que uma nova.

- **Cuidados:** Exige um **Smart BMS** robusto para monitorar as células mais velhas, que tendem a desbalancear com mais frequência.

#### 4. Valor de Revenda e Sustentabilidade

- **Lucro Residual:** Em vez de pagar pelo descarte, o montador pode vender packs usados para projetos de iluminação de jardim ou cercas elétricas.
- **Logística Reversa:** Implementar um programa de "troca com desconto" para clientes antigos garante que você recupere células conhecidas para projetos de segunda vida.

A **Solda Ideal** é o que permite a segunda vida. Se o pack original foi montado com soldas de baixa qualidade, o calor gerado ao longo dos anos degrada a química da célula de forma desigual, tornando-a perigosa para reaproveitamento.

## 16.2 Métricas, Ensaios de Laboratório e Modelos de Negócio em Segunda Vida

A transição de um pack de baterias para a sua fase de segunda vida (*Second Life*) não é um mero processo de reaproveitamento estético; trata-se de um retrabalho de engenharia complexo que exige a reavaliação matemática e eletroquímica de cada célula ou módulo.

Abaixo, aprofundamos os critérios laboratoriais para triagem, as mudanças no comportamento dinâmico do lítio envelhecido e a viabilidade econômica desse mercado.

### 1. Métricas Avançadas de Triagem: A Identificação do "Lixo" vs. "Ouro"

Para reindustrializar um módulo de bateria de forma segura, o laboratório deve ir além do teste básico de capacidade e avaliar três parâmetros críticos de degradação:

#### 16.2.1 Análise de Impedância por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

À medida que a bateria envelhece, a perda de lítio ciclável e o crescimento da camada SEI alteram a assinatura de impedância da célula.

- **O Teste:** O ensaio de EIS aplica pequenas perturbações de corrente alternada em uma varredura de frequências 0,1Hz a 10kHz.
- **O Critério:** Células onde a resistência de transferência de carga dobrou em relação ao valor nominal de fábrica devem ser descartadas. Elas sofrerão aquecimento severo por efeito Joule mesmo sob correntes baixas em uso estacionário.

### 16.2.2 Monitoramento da Taxa de Autodescarga Estática Progressiva

Módulos envelhecidos tendem a desenvolver micro curtos internos devido à formação incipiente de dendritos.

- **O Teste:** Após a carga até 3,8V (tensão de armazenamento), o módulo deve permanecer isolado em prateleira monitorada por **21 a 30 dias**.
- **O Critério:** Uma perda de tensão superior a **0,02V por semana** indica uma célula "vampira". Se agrupada em um novo pack estacionário, ela desbalanceará a série constantemente, forçando a BMS a trabalhar no limite ou a cortar a carga precocemente.

### 16.3 O Comportamento Dinâmico do Lítio Envelhecido

Ao projetar o novo sistema estacionário (ESS) com células de segunda vida, as curvas de carga e descarga devem ser reprogramadas na nova BMS, pois a química do componente já não responde como nova:

- **Achatamento da Curva de Descarga:** A janela útil onde a voltagem permanece estável diminui. O fenômeno de *voltage sag* (queda de tensão sob carga) torna-se muito mais acentuado.
- **Redução da Janela de Tensão Operacional (Derating):** Para maximizar os anos restantes de operação da bateria de segunda vida, a engenharia adota uma estratégia de alívio químico. Em vez de carregar a célula até os 4,20V nominais, o limite superior da BMS é reconfigurado para **4,05V ou 4,10V**. Na extremidade inferior, o corte é elevado de 2,50V para **3,00V**. Essa restrição sacrifica cerca de 10% da capacidade remanescente, mas **reduz o estresse mecânico interno e estende a sobrevida do pack em até 40%**.

### 16.4 Cenário Econômico e Estudo de Caso: Novo vs. Segunda Vida

A viabilidade comercial de baterias de segunda vida reside no custo de aquisição da matéria-prima (o pack descartado) somado ao custo de processamento industrial (mão de obra de desmontagem, testes e nova eletrônica).

#### Estudo de Caso de Custo Estrutural (Base: Banco de Energia Solar de 10 kWh)

- **Opção A: Pack de Lítio-Íon/LiFePO4 Novo Industrializado**
  - Custo por kWh instalado: R\$ 1.800,00
  - Investimento Total: **R\$ 18.000,00**
  - Expectativa de Vida: 10 anos (operando a 80% DoD).

- **Opção B: Pack Remanufaturado de Segunda Vida (Ex-Automotivo)**
  - Custo de aquisição do módulo automotivo original a 80% SOH: R\$ 400,00kWh
  - Custos de triagem laboratorial, nova BMS e gabinete: R\$ 450,00 kWh
  - Custo total por kWh instalado: R\$ 850,00
  - Investimento Total: **R\$ 8.500,00**
  - Expectativa de Vida: 5 a 6 anos (operando com *derating* em uso solar estacionário).

**Conclusão Financeira:** O custo inicial reduzido em **mais de 50%** viabiliza o uso de segunda vida para projetos onde o capital inicial de investimento é o principal fator de decisão, entregando um custo de amortização por ciclo altamente competitivo.

## 16.5 Barreiras Regulatórias e a Logística Reversa

A implementação em escala industrial de baterias de segunda vida enfrenta desafios jurídicos e normativos que o engenheiro projetista deve dominar:

- **A Quebra da Responsabilidade Legal (Garantia):** Quando uma empresa desmancha o pack de um fabricante automotivo original (ex: BYD, Tesla, Nissan) para criar um banco estacionário, a responsabilidade civil e técnica em caso de sinistro ou incêndio é **transferida integralmente para a empresa que realizou a remanufatura.**
- **Normativas Técnicas Emergentes:** Padrões internacionais como a **UL 1974** (*Standard for Evaluation for Repurposing Batteries*) regulamentam especificamente os processos de triagem e classificação de baterias para aplicações de segunda vida, exigindo certificação dos laboratórios de ensaio.
- **Gestão de Resíduos no Brasil (PNRS):** O operador de segunda vida torna-se um elo central da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ele adia o descarte em alguns anos, mas assume a obrigação contratual de destinar o pack para a reciclagem hidrometalurgia assim que o SOH atingir o limite crítico final de 50%.

# Glossário

## Glossário Técnico: Termos Essenciais do Projetista

### A. Termos de Célula e Performance

- **C-Rate (Taxa C):** Medida da velocidade de carga ou descarga. 1C significa descarregar a bateria inteira em 1 hora. Drones usam taxas altas (30C+), enquanto Power Walls usam taxas baixas (0.5C).
- **Capacidade (Ah/mAh):** A "quantidade de combustível" na bateria. 1Ah = 1000mAh. Indica quanta corrente a célula entrega em uma hora.
- **DoD (Depth of Discharge):** Profundidade de Descarga. É a porcentagem da bateria que foi usada. Evitar 100% de DoD aumenta a vida útil.
- **IR (Internal Resistance):** Resistência Interna. Medida em miliohms. Como visto na imagem, uma IR alta causa **Solda Queimada** e aquecimento excessivo.
- **OCV (Open Circuit Voltage):** Tensão de Circuito Aberto. É a voltagem da célula em repouso. Essencial para a triagem e identificação de células com autodescarga.
- **SoC (State of Charge):** Estado de Carga. Indica a porcentagem atual de energia na bateria (0% a 100%).

### B. Termos de Montagem e Hardware

- **BMS (Battery Management System):** O cérebro do pack. Protege contra sobrecarga, descarga profunda e curto-circuito.
- **Busbar (Barramento):** Peças metálicas (geralmente níquel ou cobre) que conectam as células. Devem ser dimensionadas para não esquentar.
- **Nickel Strips (Fita de Níquel):** O material usado para a soldagem a ponto. O **Níquel Puro** é o padrão para a **Solda Ideal** da sua imagem.
- **Series (S) vs. Parallel (P):** **S** soma a tensão (Voltagem); **P** soma a capacidade (Autonomia). Ex: 10S4P.
- **Spot Welding (Soldagem a Ponto):** Processo de fusão por pulso elétrico. O guia visual da imagem mostra como identificar a fusão correta (Ideal) vs. falhas (Fria/Queimada).

### C. Termos de Negócio e Indústria

- **CAPEX (Capital Expenditure):** Investimento inicial em máquinas (Soldadores, Multímetros, Bancadas).
- **EOL (End-of-Life / End-of-Line):** Pode significar o descarte final da bateria ou o último teste na linha de produção antes da venda.
- **OPEX (Operating Expenditure):** Custos recorrentes para manter o negócio (energia, fretes de garantia, manutenção de ferramentas).
- **Rastreabilidade:** Capacidade de identificar a origem de cada componente do pack por meio de seriais e logs de produção.

### D. Termos em Geral

Como boa parte da literatura técnica disponível é no idioma inglês, para cada termo em português, colocaremos o seu equivalente em inglês.

**Acumulador (Accumulator).** Uma bateria galvânica que, após a descarga, pode ser restaurada para o estado carregado pela passagem de uma corrente elétrica através da célula na direção oposta da descarga. O mesmo que bateria recarregável. O mesmo que bateria secundária.

**Ampère-hora (Ampere-Hour Capacity).** A quantidade de energia elétrica medida em Ampère-hora (Ah), que pode ser entregue por uma célula ou bateria ou a quantidade de energia elétrica necessária para restaurar o estado inicial de carga da bateria.

**Ânion (Anion).** Íon no eletrólito carregando carga negativa.

**Ânodo (Anode).** O eletrodo em uma célula eletroquímica onde ocorre a oxidação. Durante a descarga, o eletrodo negativo da célula é o ânodo. Durante a carga, a situação inverte e o eletrodo positivo da célula é o ânodo.

**Autodescarga (Self-Discharge).** A perda de capacidade útil de uma célula ou bateria devido a reações química internas quando a bateria está armazenada fora de uso.

**Balanceamento (Equalization).** O processo de restauração de todas as células em uma bateria para um estado de carga igual.

**Bateria (Battery).** Uma ou mais células eletroquímicas conectadas eletricamente em uma disposição em série ou paralelo, para fornecer os níveis de tensão e corrente de operação necessários incluindo, se houver, monitores, controles e outros componentes auxiliares (fusíveis, diodos), caixas, terminais e marcações.

**Bateria em Espera (Standby Battery).** Uma bateria projetada para uso de emergência em caso que a potência principal falha.

**Bateria Estacionária (Stationary Battery).** Uma bateria secundária projetada para uso em um local fixo.

**Bateria Recarregável (Rechargeable Battery).** Uma bateria galvânica que, após a descarga, pode ser restaurada para o estado carregado pela passagem de uma corrente elétrica através da célula na direção oposta à da descarga.

**Bateria Secundária (Secondary Battery).** Bateria recarregável

**Bateria Tracionaria (Traction Battery).** Uma bateria recarregável projetada para a propulsão de veículos elétricos ou equipamentos móveis operados eletricamente operando em um regime de ciclo profundo.

**Capacidade (Capacity).** O número total de Ampère-hora (Ah) que pode ser retirado de uma bateria carregada ou bateria em condições específicas de descarga. A capacidade de uma bateria é a corrente que se pode tirar de uma bateria num dado período ou em outras palavras, a energia que se pode tirar de uma bateria. Mede-se em ampère-hora (Ah) ou miliampère-hora (abreviada mAh). Por exemplo, uma bateria de 1.300 mAh pode alimentar uma carga com 65 mA durante 20 horas ( $65 \text{ mA} \times 20 \text{ horas} = 1.300 \text{ mAh}$ ). Da mesma forma, uma bateria de 1.300 mAh pode alimentar uma carga com 13 mA durante 100 horas ( $13 \text{ mA} \times 100 \text{ horas} = 1.300 \text{ mAh}$ ).

**Capacidade disponível (Available Capacity).** A capacidade total (Amp-horas) que será obtida a partir de uma célula ou bateria a taxas de descarga definidas e outras condições de descarga ou operação especificadas.

**Capacidade Nominal (Rated Capacity).** O número de Ampère-horas que uma bateria pode fornecer em condições específicas.

**Capacidade Wh (Watt-hour Capacity).** A quantidade de energia elétrica medida em Wh (watt hora) que pode ser entregue por uma célula ou bateria sob condições especificadas.

**Carga (Charge).** A conversão de energia elétrica, fornecida sob a forma de uma corrente de uma fonte externa, em energia química dentro de uma célula ou bateria.

**Carga (Load).** Dispositivo elétrico ou eletrônico que uma vez conectado na bateria drena sua energia.

**Carga de Corrente Constante (Constant Current Charge).** Um método de carregar a bateria usando uma corrente constante ou que tenha pequena variação.

**Carga de Flutuação (Float Charge).** Um método para manter uma bateria em uma condição carregada continuamente. Carga a longo prazo de tensão constante, a um nível suficiente para equilibrar a auto descarga.

**Carga de Tensão Constante (Constant Voltage Charge).** Um método de carregar a bateria aplicando uma tensão fixa, E permitindo variações na corrente. Também chamado de carga de potencial constante.

**Carga Pulsada (Trickle Charge).** Uma carga a baixa taxa, equilibrando perdas através de uma ação local e / ou descarga periódica, para manter uma bateria em uma condição totalmente carregada.

**Carga Rápida (Fast Charge).** Uma taxa de carga que retorna à capacidade total de uma bateria recarregável, geralmente dentro de uma hora.

**Cátion (Cation).** Íon no eletrólito que carrega uma carga positiva.

**Cátodo (Cathode).** O eletrodo em uma célula eletroquímica onde a redução ocorre. Durante a descarga, o eletrodo positivo da célula é o catodo. Durante a carga, a situação inverte e o eletrodo negativo da célula é o catodo.

**Célula (Cell).** A unidade eletroquímica básica que fornece uma fonte de energia elétrica por meio de conversão de energia química. A célula consiste em uma montagem de eletrodos, separadores, eletrólito, recipiente e terminais,

**Célula ou Bateria Primária (Primary Cell or Battery).** Uma célula ou bateria que não pode ser recarregada e é descartada quando a célula ou bateria fornecem toda a sua energia elétrica.

**Célula Prismática (Prismatic Cell).** Célula em formato de paralelepípedo.

**Célula com Válvula (Vented Cell).** Um projeto de célula incorporando um mecanismo de ventilação para aliviar a pressão excessiva e expulsar gases gerados durante a operação ou abuso da célula.

**Ciclo (Cycle).** A descarga e a carga subsequente ou anterior de uma bateria secundária, tal como quando é restaurada nas suas condições originais.

**Ciclo de Vida (Cycle Life).** O número de ciclos em condições especificadas que estão disponíveis a partir de uma bateria secundária antes que ela não atenda aos critérios especificados quanto ao desempenho.

**Ciclo de Trabalho (Cycle Service).** Um ciclo de funcionamento caracterizado por sequências de carga e descarga frequente e geralmente profunda.

**Ciclo de Funcionamento (Duty Cycle).** O regime operacional de uma célula ou bateria incluindo fatores como taxas de carga e descarga, profundidade da descarga, duração do ciclo e duração do tempo em modo de espera.

**Coletor de Corrente (Current Collector).** Um membro inerte de alta condutividade elétrica usado para conduzir corrente de ou para um eletrodo durante a descarga ou carga.

**Condicionamento (Conditioning).** Ciclo de carga e descarga numa bateria para garantir que seja totalmente carregada. Às vezes é indicado quando uma bateria é colocada em serviço pela primeira vez ou retornou ao serviço após um armazenamento prolongado.

**Controle de Carga (Charge Control).** Técnicas de controle de carga para encerrar efetivamente o carregamento de uma bateria recarregável

**Corrente de Curto Circuito (Short-Circuit Current).** O valor inicial da corrente obtida de uma bateria em um circuito de resistência insignificante.

**Densidade (Density).** A proporção entre uma massa de material e o seu próprio volume a uma temperatura especificada.

**Densidade de Corrente (Current Density).** A área ativa atual por unidade de superfície de um eletrodo.

**Densidade de Energia (Energy Density).** A proporção da energia disponível em uma bateria e o seu volume (Wh /l).

**Densidade de Potência (Power Density).** A proporção entre a potência disponível de uma bateria e o seu volume ( $W / L$ ).

**Descarga (Discharge).** A conversão da energia química de uma célula ou bateria em energia elétrica que é retirada da bateria e transferida a uma carga.

**Descarga Profunda (Deep Discharge).** Retirada de pelo menos 80% da capacidade nominal de uma bateria.

**Descarga Rasa (Shallow Discharge).** Uma descarga em uma bateria secundária que equivale apenas a uma pequena parte de sua capacidade total.

**Eletrodo (Electrode).** A área ou local em que os processos eletroquímicos ocorrem.

**Eletrodo Positivo (Positive Electrode).** O eletrodo que atua como um cátodo quando uma célula ou bateria está descarregando.

**Eletrólito (Electrolyte).** O meio que fornece o mecanismo de transporte iônico entre os eletrodos positivo e negativo de uma célula.

**Efeito Memória (Memory Effect).** Um fenômeno em que uma célula, operada em sucessivos ciclos de carga e descarga incompleta, perde temporariamente o resto da sua capacidade em níveis de tensão normais.

**Energia Específica (Specific Energy).** A proporção entre a energia produzida por uma célula ou bateria e o seu peso ( $Wh / kg$ ).

**Envelhecimento (Aging).** Perda permanente de capacidade devido ao uso repetido ou à passagem do tempo.

**Estado de Carga (State-of-Charge - SOC)** A capacidade disponível em uma bateria expressa em porcentagem da capacidade nominal.

**Fuga Térmica (Thermal Runaway).** Uma condição em que uma bateria em carga ou descarga superaquecerá e se destruirá através da geração interna de calor causada por alta sobrecarga ou descarga excessiva ou outra condição abusiva.

**Gravidade Específica (Specific Gravity).** A gravidade específica de uma solução é a proporção do peso da solução para o peso de um volume igual de água a uma temperatura especificada.

**Ligação Paralela (Parallel).** O termo ligação paralela é usado para descrever a interconexão de células ou baterias em que todos os terminais similares estão conectados entre si. A capacidade da bateria resultante é a soma das capacidades individuais de cada célula. A tensão da bateria resultante é a mesma de cada célula.

**Ligação em Série (Series).** A interconexão de células ou baterias de tal maneira que o terminal positivo da primeira está conectado ao terminal negativo da segunda, e assim por diante. Series A tensão da bateria resultante é a soma das tensões de cada célula. A capacidade da bateria resultante é a mesma de cada célula.

**Passivação (Passivation).** Passivação é a modificação do potencial de um eletrodo no sentido de menor atividade (mais catódico ou mais nobre) devido a formação de uma película de produto de corrosão. Os metais e ligas metálicas que se passivam são os formadores de películas protetoras.

**Perda de Capacidade (Capacity Fade).** Perda gradual de capacidade de uma bateria secundária com ciclos de carga e descarga.

**Potência Específica (Specific Power).** A relação entre a potência fornecida por uma célula ou bateria e o seu peso ( $W / kg$ ).

**Potencial do Eletrodo (Electrode Potential).** A tensão desenvolvida por uma única placa, positiva ou negativa contra um eletrodo de referência. A diferença de tensão entre dois eletrodos é igual à tensão da célula.

**Prazo de Validade (Shelf Life).** A duração do armazenamento em condições especificadas no final das quais uma célula ou a bateria ainda mantém a capacidade de dar um desempenho especificado.

**Profundidade de Descarga (Depth of Discharge - DOD)** A proporção entre a quantidade de eletricidade (normalmente em Ah) removida de uma célula ou bateria na descarga e a sua capacidade nominal.

**Recarga (Recharge).** Um método que retorna à capacidade total de uma bateria recarregável.

**Recuperação (Recovery).** A redução da polarização de uma célula durante os períodos de descanso.

**Rendimento (Efficiency).** A proporção entre a capacidade de saída de uma célula secundária ou bateria na descarga e a energia necessária para restaurá-la ao estado inicial de carga em condições especificadas.

**Retenção de Capacidade (Capacity Retention).** A fração da capacidade total disponível de uma bateria sob condições especificadas de descarga após ter sido armazenada por um período de tempo.

**Separador (Separator).** Um espaçador ou material permeável a íons, eletronicamente não condutor, que evita o contato eletrônico entre eletrodos de polaridade oposta na mesma célula.

**Sobrecarga (Overcharge).** Forçar a corrente através de uma bateria depois de todo o material ativo ter sido convertido no estado carregado. Em outras palavras, o carregamento continuou após 100% de a carga ter sido alcançada.

**Sobre descarga (Overdischarge).** Continuar a descarga após o ponto em que a capacidade total da bateria foi obtida.

**Sobre tensão (Overvoltage).** Valor de tensão de carga superior ao valor máximo especificado.

**Sulfatação (Sulfation).** Processo de sulfatação que ocorre em baterias de chumbo que foram armazenadas e permitidas auto descarregar por longos períodos de tempo. Crescem grandes cristais de sulfato de chumbo que interferem com a função dos materiais ativos.

**Taxa C (C Rate).** Uma bateria sendo carregada com uma corrente de 1C significa que está sendo carregada com a corrente nominal. Uma bateria sendo carregada com uma corrente de 0,5C significa que está sendo carregada com metade corrente nominal. Uma bateria sendo descarregada com uma corrente de 1C significa que está sendo descarregada com a corrente nominal. Uma bateria sendo descarregada com uma corrente de 0,5C significa que está sendo descarregada com metade corrente nominal.

**Taxa de Carga (Charge Rate).** A corrente aplicada a uma célula ou bateria secundária para restaurar sua capacidade. Esta taxa é comumente expressa como um múltiplo da capacidade nominal da célula ou bateria. Por exemplo, a taxa de carga C / 10 de uma célula ou bateria de 2000mAh equivale a 200 mAh (C/10 ou 2000/10)

**Taxa de Descarga (Discharge Rate).** A taxa, geralmente expressa em Amperes, na qual a corrente elétrica é tirada da célula ou da bateria.

**Tensão de Circuito Aberto (Open-Circuit Voltage - OCV).** A diferença de tensão entre os terminais de uma célula ou tensão quando o circuito está aberto (condição sem carga).

**Tensão de Circuito Fechado (Closed-Circuit Voltage - CCV).** O potencial ou a tensão de uma célula ou bateria quando é descarregada, normalmente sob uma carga especificada.

**Tensão de Corte (Cutoff Voltage).** A tensão da bateria na qual a descarga está terminada. Também chamado tensão final.

**Tensão Nominal (Nominal Voltage).** A tensão de operação característica ou valor médio entre a tensão máxima na carga e a tensão mínima na descarga.

**Tensão sob Carga (On-Load Voltage).** A diferença de tensão entre os terminais de uma célula ou bateria quando está descarregando.

**Tensão de Trabalho (Working Voltage).** A tensão típica de uma bateria durante a descarga.

**Válvula (Vent).** Um mecanismo normalmente vedado que permite o escape controlado de gases dentro de uma célula.

**Vida (Life).** Vida para baterias recarregáveis é a duração com um desempenho satisfatório, medido em anos ou no número de ciclos de carga/descarga.

**Vida Útil (Service Life).** O período de vida útil de uma bateria primária antes de um ponto final predeterminado onde a tensão mínima é alcançada ou o número de ciclos em condições especificadas que estão disponíveis a partir de uma bateria secundária antes que ela não atenda aos critérios especificados quanto ao desempenho.

## Referências Bibliográficas

- Baterias Recarregáveis Para Equipamentos Portáteis. Aldo Michelini. 2017.
- Batteries in a Portable World. Isidor Buchmann .2011.
- DIY Lithium Batteries. Micah Toll. 2017.
- Handbook of Batteries. David Linden. Thomas B. Reddy. 1995.
- Ni-Mh Handbook. Industrial Batteries. Panasonic. 2015.
- Nickel Cadmium Batteries Technical Handbook. Panasonic. 2002.
- Lithium Handbook. Industrial Batteries. Panasonic.
- Nickel Cadmium Batteries Technical Handbook. GP Batteries. 2002.
- Internal resistance matching for parallel-connected lithium-ion cells and impacts on battery pack cycle life. Journal of Power Sources. Radu Gogoana. Matthew B. Pinson. Martin Z. Bazant. Sanjay E. Sarma. 2013.
- Connecting batteries in parallel. Unexpected effects and solutions. Battery Power Conference Sept. 18 2012. Davide Andrea, Elithion
- Manual das Baterias Recarregáveis. S.T.A. 2003.
- Safety of lithium-ion batteries. The European Association for Advanced Rechargeable Batteries. 2013.
- Baterias Recarregáveis. Introdução aos materiais e cálculos. Rubens Nunes de Faria Junior, Lia Maria Carlotti Zarpelon, Marilene Morelli Serna. 2014.
- Rechargeable Batteries. Applications Handbook. Technical marketing staff of Gates Energy Products, Inc.
- Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment - Final Report - Prepared by: Celina Mikolajczak, PE Michael Kahn, PhD Kevin White, PhD Richard Thomas Long, PE Exponent Failure Analysis Associates, Inc. 2011. Fire Protection Research Foundation.
- A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications Anthony Barré, Benjamin Deguilhem, Sebastien Grolleau, Mathias Gérard, Frédéric Suard, Delphine Riu.
- Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries. Peter Keil, Simon F. Schuster, Jorn Wilhelm, Julian Travi, Andreas Hauser, Ralph C. Karl, Andreas Jossena. Institute for Electrical Energy Storage Technology, Technical University of Munich (TUM), Munich, Germany.
- Effects of cycling on lithium-ion battery hysteresis and overvoltage. V. J. Ovejas, A. Cuadras.
- Active Cell Balancing in Battery Packs. Stanislav Arendarik Roznov.
- Controle do balanceamento de bateria e estimação de estado de carga. André Abido Figueiró.
- Solving Heating Issues with Heat Transfer Simulation. Ajay Harish.

- Management System (BMS) for Lithium-Ion Batteries. José Miguel Branco Marques.
- Overview of Lithium ion batteries – Panasonic technical brochure.
- Choices of Primary Batteries – [www.batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com)
- Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements  
Yu Miao, Patrick Hynan, Annette von Jouanne, Alexandre Yokochi.
- Tadiran Lithium Batteries. Technical brochure.
- Primary Lithium Cells - Lithium Manganese Dioxide LiMnO<sub>2</sub> - Sales Program and Technical Handbook. Varta.
- Lithium Ion Rechargeable Batteries Technical Handbook. Sony.
- NCR 18650B. Product Datasheet. Panasonic.
- Investigation on Internal Short Circuit Identification of Lithium-Ion Battery Based on Mean-Difference Model and Recursive Least Square Algorithm. Xu Zhang, Yue Pan, Enhua Wang, Minggao Ouyang, Languang Lu, Xuebing Han, Guoqing Jin, Anjian Zhou. Huiqian Yang.
- L91 and L92. Product Datasheet. Energizer.
- Como embalar e enviar baterias com segurança. UPS.
- Design and Optimization of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicle Applications. Nansi Xue. 2014
- PTC Self-heating Experiments and Thermal Modeling of Lithium-ion Battery Pack in Electric Vehicles. Chengning Zhang, Xin Jin, Junqiu Li.
- Thermal Management of Lithium-ion Battery Packs. Desmond Adair, Kairat Ismailov, Zhumabay Bakenov.
- Lithium Batteries Guidance. DHL.
- Modelling and Evaluation of Battery Packs with Different Numbers of Paralleled Cells. Fengqi Chang, Felix Roemer, Michael Baumann, Markus Lienkamp.
- Inhomogeneities in Battery Packs. Steven Neupert, Julia Kowal.

## Sobre a S.T.A.

S.T.A. - Sistemas e Tecnologia Aplicada é uma empresa nacional, com atuação nos setores eletroeletrônico, ciclístico e ferroviário. A S.T.A. possui sede na cidade de Cotia na Grande São Paulo e tem escritórios comerciais em Shenzhen e Changzhou na China. Hoje a empresa tem três unidades de negócios:

- **Unidade de Eletrônica**

Importa e distribui produtos eletrônicos, informática e elétrica. Temos mais de 3.000 itens em estoque para pronta entrega. Distribuimos baterias de níquel-cádmio, baterias de níquel-metal-hidreto, baterias de Lítio-íon, baterias seladas, pilhas comuns, pilhas alcalinas, conectores, cabos, ferramentas, leds, instrumentos e acessórios de informática.

- **Unidade de Ciclismo**

Importa e distribui produtos para ciclismo. Distribui capacetes, bombas de ar, faróis, lanternas, sirenes, campainhas, porta garrafas, cadeados, produtos de lubrificação e limpeza, pneus, câmaras de ar.

- **Unidade de Ferrovias**

Fabrica balanças para pesagem de trens em movimento. As balanças fabricadas pela S.T.A. são homologadas pelo Inmetro e permitem a pesagem de trens até 50 km/hora.

A história da S.T.A. começa em 1988 quando seus sócios, ex-engenheiros do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - I.P.T., resolvem se unir para criar uma empresa para atuar no ramo ferroviário.

Naquela época, os trens eram pesados parando-se cada vagão em cima de uma balança estática. Isso tornava o processo de pesagem dos trens extremamente caro e demorado.

O objetivo inicial da nova empresa, a S.T.A., era desenvolver a tecnologia necessária para fabricar uma balança que fosse capaz de pesar o trem em movimento, equipamento inédito nessa época em nosso país.

Assim, desenvolvendo tecnologia própria, em 1989 a S.T.A. instalou na Estrada de Ferro Carajás da Vale S.A., a primeira balança ferroviária para pesagens de trens em movimento fabricada no Brasil.

O pioneirismo e a tecnologia do projeto fizeram com que durante mais de dez anos a empresa fosse a única fabricante desse tipo de balança no país. Desde essa época até hoje, a S.T.A. já forneceu balanças para as principais ferrovias do país e empresas de grande porte com terminais ferroviários próprios.

No ano de 1994, a S.T.A. passou também a fabricar outdoors eletrônicos para propaganda ao ar livre. Novamente desenvolvendo tecnologia própria, em 1994 instalou no Vale do Anhangabaú em São Paulo, o primeiro outdoor eletrônico a cores fabricado no Brasil, com 72 m<sup>2</sup> de área.

Durante três anos, forneceu outdoors eletrônicos para as principais capitais brasileiras entre as quais Salvador em sociedade com o grupo Chiclete Com Banana.

Em 1997, por questões de mercado, a S.T.A. interrompeu a fabricação de outdoors eletrônicos e passou a se dedicar à importação e distribuição de baterias recarregáveis para telefone sem fio e para uso industrial e doméstico.

A partir de 1999 a S.T.A. iniciou a fabricação de packs de baterias. Com isso passou a fornecer baterias feitas sob medida para atender as necessidades de cada cliente.

Em 2001 a S.T.A. abriu escritório comercial em Shenzhen na China para agilizar os processos de importação bem como para aumentar o controle de qualidade sobre os produtos importados além de expandir sua linha de produtos, passando a importar cabos e conectores para audio, video e informática.

Em 2003 a S.T.A. criou sua marca registrada RONTEK com o objetivo de oferecer a seus clientes produtos confiáveis e de qualidade garantida.

Com a expansão dos negócios, a S.T.A. se viu obrigada a aumentar a área de suas instalações e por isso em 2009 se mudou para sede própria na cidade de Cotia na Grande São Paulo.

Em 2012 a S.T.A. resolveu diversificar sua linha de atuação e iniciou a importação e distribuição de produtos para bicicletas.

Para maiores informações ou entrar em contato acesse o site da empresa [www.stacorp.com.br](http://www.stacorp.com.br)

Para maiores informações sobre baterias acessar o site [www.sta-eletronica.com.br](http://www.sta-eletronica.com.br) ou acessar o canal da empresa no Youtube - RONTEK TV.