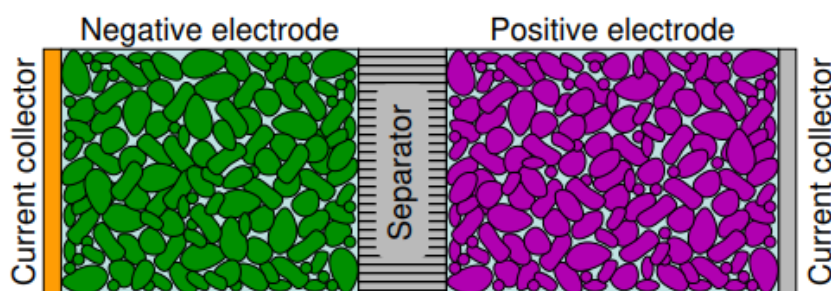


1.4.4 O que são o SOC da célula e o SOC do pacote de bateria

Continuando nossa exploração do quarto requisito do BMS, o Gerenciamento de Desempenho, esta aula foca no conceito central de **Estado de Carga (SOC)**. Embora tenhamos uma noção intuitiva do SOC a partir dos medidores de bateria em seus dispositivos eletrônicos — onde 100% significa cheio e 0% significa vazio — é crucial que um engenheiro de BMS entenda a questão mais profunda: Esse valor exibido corresponde a uma grandeza física real dentro da célula da bateria, mesmo que não possa ser medido diretamente?

A Base Física do SOC da Célula: A Concentração de Lítio

O estado de carga de uma célula de íon-lítio não é um conceito abstrato; está diretamente ligado a uma grandeza física tangível. À medida que uma célula de íon-lítio opera, o lítio se move de um lado para o outro entre os dois eletrodos.



- **Durante a descarga:** O lítio se move do eletrodo negativo para o eletrodo positivo.
- **Durante a carga:** O lítio se move do eletrodo positivo de volta para o eletrodo negativo.

Portanto, o estado de carga da célula pode ser fisicamente definido pela **concentração média de lítio armazenada nas partículas do eletrodo negativo**. Uma alta concentração de lítio no eletrodo negativo corresponde a um alto estado de carga, enquanto uma baixa concentração corresponde a um baixo estado de carga.

Da Estequiometria do Eletrodo ao Estado de Carga da Célula

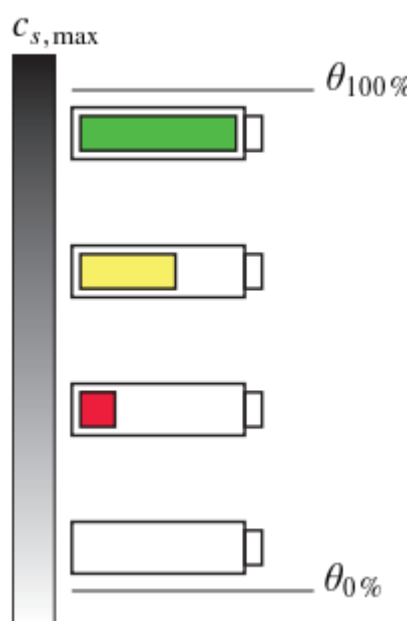
No nível microscópico, podemos descrever o quão "cheio" um eletrodo está usando um valor normalizado chamado **estequiometria**, frequentemente representado pela letra grega teta (θ). A estequiometria é a razão entre a concentração média atual de lítio e a concentração máxima possível que o

material pode conter, resultando em um valor entre 0 (completamente vazio) e 1 (completamente cheio).

Uma distinção crucial, no entanto, é que por razões de segurança e longevidade, uma célula de bateria **nunca é operada em toda essa faixa de estequiometria de 0 a 1**. Em vez disso, ela opera dentro de uma janela definida:

- **0% de SOC da célula** corresponde a uma *estequiometria mínima permitida* ($\theta_0\%$), que é um valor maior que 0.
- **100% de SOC da célula** corresponde a uma *estequiometria máxima permitida* ($\theta_{100\%}$), que é um valor menor que 1.

O familiar SOC de 0-100% que é exibido ao usuário é um mapeamento linear da estequiometria atual da célula dentro desta janela operacional permitida. Isso também explica como é fisicamente possível sobrecarregar ou descarregar excessivamente uma célula — forçando sua estequiometria para além desses limites definidos de $\theta_{100\%}$ e $\theta_0\%$, embora isso cause danos.



Os Desafios da Estimação do SOC

Como o SOC da célula é uma grandeza física real, alguém poderia perguntar por que não podemos simplesmente criar um sensor para medi-lo diretamente. A resposta é que, atualmente, tal sensor não existe. Devemos, portanto, *estimar* o SOC usando grandezas que *podemos* medir, como tensão e corrente. No entanto, usar qualquer uma dessas medições isoladamente leva a problemas significativos.

As Limitações de Usar Apenas a Tensão

Não existe uma relação direta e unívoca entre a tensão instantânea de uma célula e seu estado de carga.

- **A Tensão Mede a Concentração na Superfície:** A tensão terminal de uma célula é primariamente uma função da concentração de lítio na *superfície* das partículas do eletrodo.
- **O SOC é a Concentração Média:** O verdadeiro SOC é uma função da concentração *média* de lítio em todo o volume das partículas.

Como o processo de **difusão** do lítio da superfície para o interior de uma partícula é lento, a concentração na superfície e a concentração média são frequentemente diferentes, especialmente quando a célula está sob carga. Elas só se igualam depois que a célula repousa por um período significativo. Além disso, a tensão também é influenciada pela temperatura e por um fenômeno conhecido como **histerese**, o que significa que a tensão pode ser diferente no mesmo SOC, dependendo do histórico recente da célula. Portanto, embora a tensão seja um *indicador indireto* útil e uma entrada crítica para algoritmos de estimação avançados, ela não é um preditor confiável do SOC por si só.

As Armadilhas de Usar Apenas a Corrente (Contagem de Coulomb)

Uma abordagem alternativa é simplesmente rastrear a quantidade de carga que entra ou sai da célula, integrando a corrente ao longo do tempo. Este método é conhecido como **contagem de Coulomb**. Embora a equação subjacente seja uma representação fisicamente exata do balanço de carga, é um método de estimação extremamente pobre e não confiável na prática. Ele sofre com o acúmulo de erros de quatro fontes, todas inevitáveis em um sistema real:

1. **Medições de corrente** imprecisas do sensor.
2. Conhecimento imperfeito da **eficiência coulômbica** da célula.
3. Conhecimento imperfeito da **capacidade total** da célula, que muda à medida que envelhece.
4. Conhecimento imperfeito do **estado de carga inicial** quando o sistema é ligado.

Por causa dessas imprecisões cumulativas, a **contagem de Coulomb nunca deve ser usada como o método principal de estimação de SOC** em um BMS robusto.

Desconstruindo o Conceito de "SOC do Pacote de Bateria"

Um termo frequentemente usado em conversas é "estado de carga do pacote de bateria". No entanto, este conceito é fundamentalmente falho e mal definido. Considere um pacote simples de duas células, onde uma célula está a 100% de SOC e a outra a 0% de SOC.

- Este pacote **não pode ser descarregado**, porque a célula de 0% está em seu limite inferior.
- Este pacote **não pode ser carregado**, porque a célula de 100% está em seu limite superior.

O pacote está completamente inutilizável. Não faria sentido atribuir a ele um SOC de 0%, 100%, ou mesmo a média de 50%, pois nenhum desses valores reflete com precisão sua incapacidade de realizar qualquer trabalho.

Este exemplo paradoxal demonstra que o termo "**estado de carga do pacote de bateria**" **não tem sentido e deve ser evitado**. O que as pessoas geralmente querem dizer quando usam este termo são outras grandezas mais precisas:

- Para o controle de ponto de ajuste (*setpoint*) em um veículo híbrido, elas se referem ao **estado de carga médio do pacote de bateria**.
- Para o cálculo de autonomia em um veículo elétrico, elas se referem à **energia restante total** no pacote de bateria.

É sempre melhor usar esses termos precisos e bem definidos em vez do ambíguo e enganoso "SOC do pacote".