

2.1.2 Como modelar a tensão de circuito aberto (OCV) e o estado de carga (SOC)

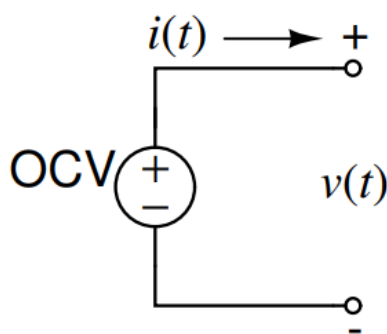
Iniciamos o processo de construção de um modelo matemático — um conjunto de equações que descreve o comportamento físico — de uma célula de bateria de íon-lítio.

A abordagem fundamental que usaremos é criar um **modelo de circuito equivalente (ECM)**. A ideia central por trás de um ECM é que a maneira como a tensão terminal de uma célula de bateria responde a uma corrente de entrada pode ser aproximada com grande precisão pela maneira como um circuito elétrico de propósito específico responde à mesma corrente.

Essa abordagem é desejável por duas razões principais. Primeiro, ela fornece uma estrutura intuitiva para entender como uma célula se comportará em diferentes cenários de uso. Segundo, e mais importante, esses modelos formam a base essencial para os algoritmos avançados do Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) que serão desenvolvidos. Nosso método será começar com um modelo muito simples e depois refiná-lo incrementalmente, passo a passo, para descrever melhor o funcionamento complexo de uma célula de bateria real.

0 Ponto de Partida: Um Modelo Simples de Fonte de Tensão

O modelo mais simples possível para uma célula de bateria é tratá-la como uma fonte de tensão ideal e independente.



Neste modelo, presume-se que a tensão da célula seja um valor único e constante, igual à sua tensão de circuito aberto (OCV), independentemente da corrente que flui através dela ou de seu histórico de uso.

Embora essa descrição seja excessivamente simplista e não seja útil para aplicações práticas de BMS, ela fornece um ponto de partida necessário. A única percepção válida que ele oferece é que uma célula de bateria de fato fornece uma tensão. Quando uma célula é desconectada de uma carga e

deixada em repouso até que todos os seus processos eletroquímicos internos atinjam um equilíbrio completo, sua tensão terminal se estabiliza em um valor previsível. Esta é a verdadeira tensão de circuito aberto, e uma fonte de tensão representando essa OCV será um componente central de nosso modelo final e mais sofisticado.

Refinamento do Modelo 1: Incorporando o Estado de Carga (SOC)

A primeira e mais óbvia maneira de melhorar nosso modelo é reconhecer que a tensão de circuito aberto de uma célula não é constante; ela é mais alta quando a célula está totalmente carregada e mais baixa quando está descarregada. Para capturar esse comportamento, devemos introduzir o conceito de **Estado de Carga (SOC)**, que denotaremos com a variável $Z(t)$.

Juntamente com o SOC, definimos a **capacidade total (Q)** da célula, que é a quantidade total de carga que a célula pode conter ao se mover entre 0% e 100% de SOC, medida em Ampere-horas.

Com essas definições, podemos escrever uma equação diferencial ordinária simples, conhecida como **equação de estado**, para descrever como o SOC muda ao longo do tempo em resposta a uma corrente de entrada, $i(t)$:

$$z'(t) = -i(t)/Q$$

Ou ainda, de forma equivalente:

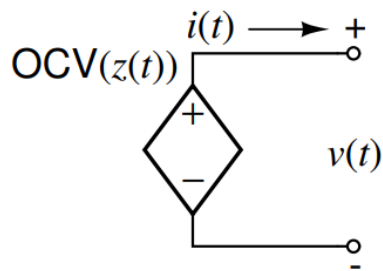
$$z(t) = z(t_0) - \frac{1}{Q} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$$

Nesta equação, um ponto sobre a variável Z indica sua derivada no tempo. Adotamos a convenção de sinal de que uma corrente positiva representa a descarga (fazendo o SOC diminuir) e uma corrente negativa representa a carga (fazendo o SOC aumentar). Para uso em um BMS digital, esta equação de tempo contínuo é convertida em uma **equação de diferenças** de tempo discreto:

$$z[k+1] = z[k] - (i[k]/Q) \times \Delta t$$

Onde k é o índice de tempo e Δt é o intervalo de amostragem.

Nosso diagrama de circuito agora é atualizado. A fonte de tensão independente é substituída por uma **fonte de tensão dependente**, cujo valor não é mais constante, mas sim uma função do estado de carga: $OCV(Z(t))$.



$$v(t) = \text{OCV}(z(t))$$

$$v[k] = \text{OCV}(z[k])$$

Refinamento do Modelo 2: Levando em Conta a Eficiência Coulômbica

O próximo refinamento é reconhecer que as células de bateria não são perfeitamente eficientes. Ao carregar uma célula, nem toda a carga elétrica fornecida é armazenada com sucesso; parte é consumida por reações secundárias indesejadas.

Para modelar isso, introduzimos um fator chamado **eficiência coulômbica**, representado pela letra grega eta (η). Este fator modifica nossa equação de estado:

$$z'(t) = -i(t)\eta(t)/Q$$

$$z[k+1] = z[k] - i[k]\eta[k]\Delta t/Q$$

O valor de η é dependente do estado:

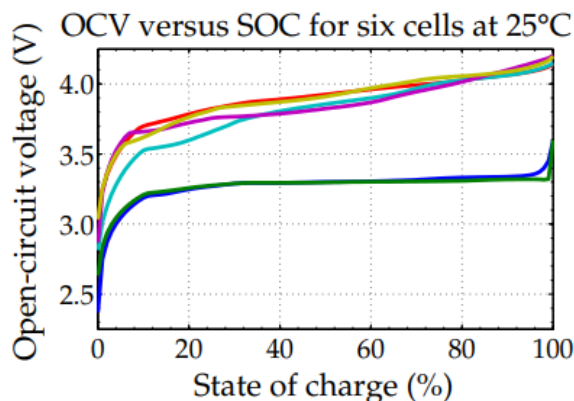
- **Durante a Carga ($i(t) < 0$):** A eficiência é ligeiramente menor que um (por exemplo, $\eta \approx 0,99$ para uma célula de alta qualidade) para levar em conta a carga perdida em reações secundárias.
- **Durante a Descarga ($i(t) > 0$):** A eficiência é modelada como sendo exatamente um ($\eta = 1$). Embora ineficiências menores existam na descarga, para os propósitos de um BMS, modelar as perdas primárias no lado da carga é suficiente e simplifica muito o modelo.

É crucial distinguir entre a **eficiência coulômbica** (~99%) e a **eficiência energética** (~95%). A eficiência coulômbica leva em conta apenas a perda de carga em reações secundárias. A eficiência energética é sempre menor porque também leva em conta a perda de energia como calor, que é gerado devido à resistência interna da célula.

A Relação da Tensão de Circuito Aberto (OCV)

A relação específica entre a tensão de circuito aberto de uma célula e seu estado de carga é uma assinatura única de sua química interna. Diferentes

projetos de células têm diferentes curvas de OCV. A figura mostra as curvas de OCV para seis tipos diferentes de células de íon-lítio, destacando o perfil muito plano das células de Fosfato de Ferro e Lítio (LFP) em comparação com os perfis mais inclinados das outras químicas.



Além disso, a OCV também é uma função da temperatura. Portanto, uma representação mais completa da fonte de tensão em nosso modelo seria $OCV(z(t), T(t))$. Também é comum na literatura ver essas curvas plotadas contra a **Profundidade de Descarga (DOD)**, que é simplesmente definida como $1 - SOC$.