2.2.4 Como determinar a tensão de circuito aberto de uma célula, que é dependente da temperatura

Aprendemos como coletar os dados de laboratório necessários para determinar a relação da Tensão de Circuito Aberto (OCV) de uma célula. Agora, é hora de processar esses dados. O objetivo final é criar um modelo que descreva a OCV como uma função tanto do Estado de Carga (SOC) quanto da temperatura. O processo envolve várias etapas, incluindo o cálculo do SOC para cada ponto de dados, a superação de um desafio de "dados ausentes" e, por fim, o ajuste de um modelo linear de temperatura aos resultados.

Passo 1: Calculando o Estado de Carga para os Dados do Teste

O primeiro passo no processamento é converter os dados brutos, que estão no domínio do tempo, para o domínio do SOC. Para fazer isso, precisamos calcular um valor de SOC para cada amostra de dados coletada.

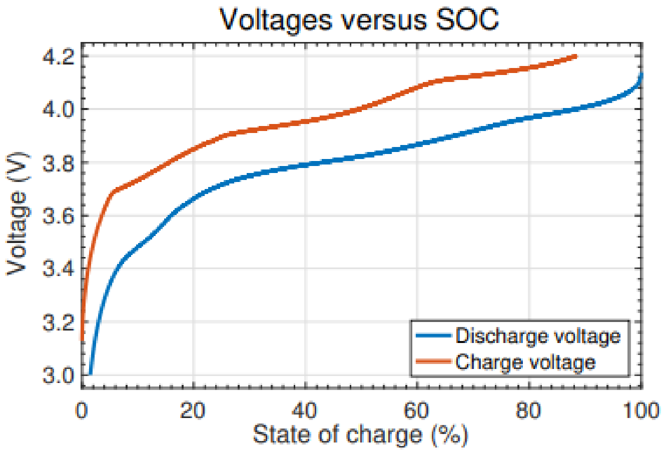
1. Primeiro, calculamos a **Profundidade de Descarga (DOD)** em Ampere-horas em cada ponto no tempo. A DOD representa a carga efetiva líquida removida da célula desde o início do teste. É calculada como o total de Ah descarregados menos o total de Ah carregados (ponderados pela eficiência coulômbica apropriada para a temperatura em que foram carregados).
2. Em seguida, o Estado de Carga (SOC) para cada amostra é calculado usando a capacidade total (Q) determinada anteriormente:

$$SOC(t) = 1 = \frac{DOD(t)}{Q}$$

Uma verificação importante é garantir que o SOC calculado seja 0% no ponto de calibração intermediário (final da etapa 4 do teste) e 100% no ponto final do teste completo.

O Desafio dos "Dados Ausentes" e o Caminho para a Solução

Uma vez que o SOC é calculado para cada ponto, podemos plotar as curvas de tensão de descarga e carga versus SOC.



Este gráfico revela um desafio fundamental:

- **Dados de descarga ausentes em baixo SOC:** Durante o teste de descarga, a tensão terminal da célula atinge a tensão de corte inferior (V_{min}) *antes* que a célula atinja 0% de SOC.
- **Dados de carga ausentes em alto SOC:** Da mesma forma, durante o teste de carga, a célula atinge a tensão de corte superior (V_{max}) *antes* de atingir 100% de SOC.

Este problema de "dados ausentes" significa que não podemos simplesmente tirar a média das duas curvas para encontrar a OCV, pois em SOCs muito altos ou muito baixos, temos dados de apenas uma das curvas.

Passo 2: Um Método para Aproximar uma Curva de OCV para uma Única Temperatura

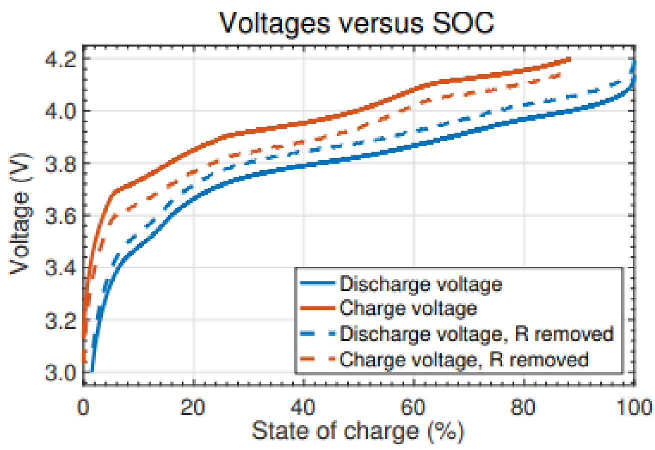
A solução para o problema dos dados ausentes é um processo de duas partes que visa criar uma única e completa curva de OCV para cada temperatura de teste.

Compensando a Resistência em Série (R_0)

A razão pela qual os limites de tensão são atingidos prematuramente é a queda de tensão através da resistência em série da célula (R_0). O primeiro passo é estimar e remover o efeito dessa resistência.

1. O valor de R_0 é estimado nos pontos de extremidade (0% e 100% de SOC) observando as mudanças de tensão instantâneas entre as diferentes etapas do teste.
2. Assume-se que R_0 varia linearmente com o SOC entre esses dois pontos de extremidade.
3. As curvas de tensão de carga e descarga medidas são então ajustadas subtraindo (para carga) ou adicionando (para descarga) a queda de

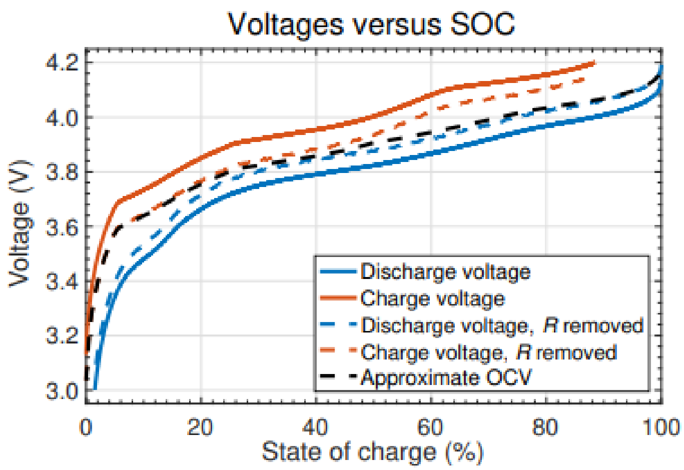
tensão $I \times R_0$ em cada ponto. Isso resulta em novas curvas "compensadas" que estão mais próximas umas das outras.



Mesclando as Curvas Compensadas

Mesmo após a compensação de R_0, o problema dos dados ausentes permanece. A etapa final é mesclar inteligentemente as duas curvas compensadas:

1. Em baixo SOC, onde temos apenas dados de carga, a curva de OCV aproximada segue a curva de carga compensada.
2. Em alto SOC, onde temos apenas dados de descarga, a curva de OCV aproximada segue a curva de descarga compensada.
3. Na região intermediária (por exemplo, em 50% de SOC), as duas curvas são mescladas linearmente para que a curva final passe exatamente no meio do caminho entre elas.



O resultado é uma única curva contínua (mostrada como a linha preta tracejada na figura) que serve como nossa **aproximação da OCV para uma única temperatura**.

Passo 3: Modelando a Dependência Combinada da Temperatura

Repetir o processo acima para cada temperatura de teste nos daria uma coleção de curvas de OCV. Armazenar tudo isso exigiria uma grande tabela de consulta 2D. No entanto, podemos explorar o fato de que a variação da OCV com a temperatura é quase perfeitamente **linear**. Isso nos permite criar um modelo muito mais eficiente:

$$OCV(z,T) = OCV0(z) + T \times OCVrel(z)$$

Neste modelo:

- $OCV0(z)$ é a relação OCV em uma temperatura de referência de **0°C**.
- $OCVrel(z)$ é o fator de correção de temperatura relativo (em V/°C) para cada SOC.

Para encontrar essas duas funções desconhecidas, $OCV0(z)$ e $OCVrel(z)$, organizamos os dados de todas as temperaturas em uma equação matricial da forma $Y = AX$. Aqui, Y é a matriz de nossas curvas de OCV aproximadas, A é uma matriz contendo as temperaturas de teste, e X é a matriz desconhecida contendo as funções $OCV0(z)$ e $OCVrel(z)$. Podemos então resolver para X usando uma **solução de mínimos quadrados**, que é computacionalmente simples de executar em Octave/MATLAB com o comando `X = A\Y`. O resultado são duas tabelas de consulta 1D que, juntas, podem ser usadas para calcular a OCV em qualquer SOC e temperatura.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \text{Approx. OCV at SOC } z, \text{ temp. } T_1 \\ \text{Approx. OCV at SOC } z, \text{ temp. } T_2 \\ \vdots \\ \text{Approx. OCV at SOC } z, \text{ temp. } T_n \end{bmatrix}}_{Y} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & T_1 \\ 1 & T_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & T_n \end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} \text{OCV0}(z) \\ \text{OCVrel}(z) \end{bmatrix}}_{X}$$