

## 2.2.3 Como determinar a eficiência coulômbica e a capacidade total de uma célula

Você aprenderá a processar os dados coletados nos experimentos de laboratório descritos anteriormente para determinar dois parâmetros estáticos fundamentais do modelo de célula: a eficiência coulômbica e a capacidade total. O método baseia-se em uma análise cuidadosa do balanço de carga ao longo do ciclo completo de teste (descarga e carga), aproveitando os pontos de calibração de 0% e 100% de SOC.

### Cálculo da Eficiência Coulômbica ( $\eta$ )

A derivação começa com a equação do Estado de Carga (SOC) em tempo discreto. O princípio fundamental que usamos é que o teste completo de OCV é um ciclo fechado: ele começa em um estado de carga calibrado de 100% e termina no mesmo estado de carga calibrado de 100%. Portanto, a mudança líquida no SOC ao longo de todo o experimento é zero.

Considerando que  $z[k_{final}] = z[0] = 1$ , a equação de SOC se simplifica para:

$$0 = \sum_{j=0}^{k_{final}-1} \eta[j] i[j]$$

Dividimos esta soma em partes de descarga (onde  $\eta = 1$ ) e partes de carga (onde  $\eta < 1$ ) para resolver para a eficiência desconhecida.

### 0 Caso para Testes a 25°C

Este é o caso mais simples, pois toda a sequência de teste ocorre a uma temperatura constante de 25°C. Isso significa que a eficiência coulômbica,  $\eta(25^\circ C)$ , também é constante durante todas as etapas de carga. Podemos então fatorá-la para fora da soma e resolver, o que resulta na seguinte relação:

$$\eta(25^\circ C) = \frac{\text{total de Ampere-horas absolutos descarregados}}{\text{total de Ampere-horas absolutos carregados}}$$

### 0 Caso para Testes em Outras Temperaturas

Quando o teste é realizado a uma temperatura  $T$  diferente de 25°C, o procedimento de calibração ainda inclui etapas a 25°C. A equação de balanço de carga agora tem dois termos de eficiência de carga diferentes:  $\eta(T)$  e  $\eta(25^\circ C)$ . Como já determinamos  $\eta(25^\circ C)$  a partir do teste de 25°C, podemos

rearranjar a equação de balanço de carga para resolver para a única incógnita restante,  $\eta(T)$ .

## Cálculo da Capacidade Total ( $Q$ )

Teoricamente, a **capacidade total** ( $Q$ ) é uma propriedade física da célula—relacionada ao número de locais disponíveis em seus eletrodos para armazenar lítio—e não deve ser uma função da temperatura. Podemos verificar isso experimentalmente.

O cálculo utiliza apenas a primeira metade do teste: da partida calibrada em 100% de SOC ( $z[0] = 1$ ) até o final da etapa de calibração em 0% de SOC ( $z[k] = 0$ ). Usamos novamente a equação de SOC, mas desta vez, a capacidade  $Q$  é a nossa incógnita. Rearranjando a equação, obtemos:

$$Q = \sum_{j=0}^{k-1} \eta[j] i[j]$$

Onde a soma é calculada sobre todos os pontos de dados desde o início do teste até a célula atingir 0% de SOC. As eficiências  $\eta[j]$  em cada ponto (seja na temperatura de teste  $T$  ou em 25°C) já são conhecidas a partir do passo anterior. Este cálculo pode ser repetido para cada temperatura de teste para verificar que  $Q$  é, de fato, largamente independente da temperatura, como mostram os resultados experimentais.

## Capacidade Total vs. Capacidade de Descarga\*\*

Um ponto comum de confusão surge ao comparar a **capacidade total** do nosso modelo com a "capacidade" normalmente listada nas folhas de dados dos fabricantes, que muitas vezes mostra uma forte dependência da temperatura. A aparente contradição é resolvida ao entender a diferença entre dois tipos de capacidade:

- **Capacidade Total ( $Q$ ):** É a quantidade máxima *física* de carga (em Ampere-horas) que pode ser armazenada na célula entre 0% e 100% de SOC. Esta é a capacidade que nosso modelo requer, e ela não é uma função da temperatura.
- **Capacidade de Descarga:** É a quantidade de carga que pode ser extraída de uma célula totalmente carregada a uma taxa de corrente constante específica antes que sua tensão terminal atinja o **limite de tensão mínima** ( $V_{min}$ ).

A **capacidade de descarga** é altamente dependente da temperatura. Em temperaturas frias, a resistência interna da célula aumenta significativamente. A maior queda de tensão interna ( $I \times R$ ) faz com que a tensão terminal atinja o limite  $V_{min}$  muito mais cedo, bem antes de a célula

estar verdadeiramente em 0% de SOC. Portanto, a capacidade *utilizável* que pode ser descarregada é menor em temperaturas frias. A capacidade total ainda está lá, mas não está acessível sem violar o limite de tensão. Nosso modelo precisa da capacidade total física para seus cálculos.

