2.1.6 Qual é uma forma rápida de obter valores aproximados para os parâmetros de um modelo

Até agora, desenvolvemos um modelo de circuito equivalente que descreve a dinâmica de uma célula de bateria, incluindo o estado de carga, a tensão de circuito aberto e a polarização. No entanto, para que este modelo seja útil para qualquer finalidade prática, precisamos conhecer os valores dos seus parâmetros, ou seja, as constantes nas equações do modelo. Precisamos determinar a relação da tensão de circuito aberto com o estado de carga, a eficiência coulómbica η, a resistência em série R_0, e os valores de resistência e capacitância do par RC R_1 e C_1.

Vamos apresentar um método simples para encontrar valores *aproximados* para esses parâmetros, especificamente para um modelo com um único ramo RC. Embora métodos mais precisos sejam abordados posteriormente, este é um exercício valioso que fornece um excelente ponto de partida.

Determinando os Parâmetros Relacionados ao SOC (Q,η,OCV)

Os primeiros parâmetros que podemos determinar estão relacionados ao estado de carga (SOC). Isso pode ser feito através de testes simples de carga e descarga completa no laboratório.

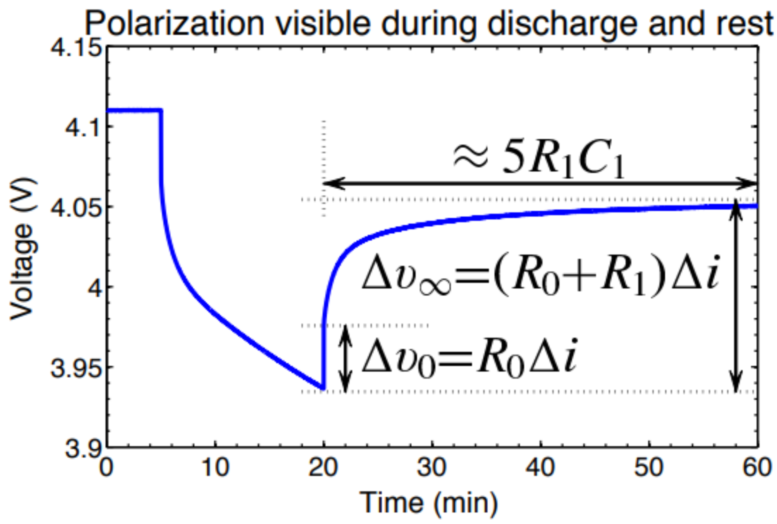
- **Capacidade Total (Q):** Para encontrar a capacidade total, começamos com uma célula totalmente carregada e a descarregamos lentamente até 0% de SOC. A quantidade total de carga removida, medida em Ampere-horas, é a capacidade de descarga da célula.
- **Eficiência Coulômbica (η):** Para encontrar a eficiência, realizamos um ciclo completo. Medimos a capacidade de descarga (carga removida de 100% a 0%) e a capacidade de carga (carga necessária para ir de 0% a 100%). A eficiência coulómbica é então calculada como:

$$\eta = \frac{capacidade\ de\ carga}{capacidade\ de\ descarga}$$

- **Relação Tensão de Circuito Aberto (OCV):** Uma aproximação para a curva OCV versus SOC pode ser encontrada realizando uma descarga muito lenta e depois uma carga muito lenta, medindo a tensão em cada ponto. A tensão durante a descarga será ligeiramente inferior à OCV e, durante a carga, ligeiramente superior. O **valor médio** das tensões de carga e descarga em cada ponto de SOC fornece uma boa aproximação da verdadeira relação OCV.

O Teste de Pulso-Relaxação para Parâmetros Dinâmicos

Para encontrar os parâmetros dinâmicos R_0, R_1, C_1, realizamos um teste de laboratório diferente. O teste consiste em aplicar um **pulso de descarga de corrente constante** a uma célula em repouso por um período definido (por exemplo, 15 minutos) e, em seguida, remover a corrente e permitir que a célula **relaxe** (descanse com corrente zero) por um longo período (por exemplo, 40 minutos). A tensão terminal da célula é registrada durante todo o teste. O gráfico resultante da tensão versus tempo é a fonte de dados para nossa análise.



Extraindo Parâmetros dos Dados de Teste: Uma Análise Passo a Passo

A partir do gráfico de resposta de tensão do teste de pulso, podemos extrair cada parâmetro dinâmico.

Passo 1: Calculando a Resistência Instantânea R_0

Quando a corrente de descarga é subitamente removida, a tensão da célula exibe um salto instantâneo para cima. De acordo com as equações do nosso modelo, nem o SOC nem a tensão do capacitor podem mudar instantaneamente. O único termo que pode mudar instantaneamente é a queda de tensão através do resistor em série, $i(t)R_0$. Portanto, essa mudança de tensão instantânea Δv_0 deve ser igual à mudança na corrente Δi multiplicada pela resistência R_0.

$$R_0 = \frac{|\ \Delta v_0\ |}{|\ \Delta i\ |}$$

Passo 2: Calculando a Resistência de Difusão R_1

Após o salto instantâneo, a tensão continua a subir lentamente até atingir um valor de estado estacionário em repouso. A mudança de tensão *total* desde o ponto mais baixo (no final do pulso) até o valor final de estado estacionário Δv_∞ é devida ao efeito combinado de R_0 e R_1. A análise de circuitos nos mostra que essa mudança de tensão total é dada por:

$$\mid \Delta v_\infty \mid = (R_0 + R_1) \mid \Delta i \mid$$

Como já conhecemos R0, Δv∞ e Δi, podemos rearranjar para encontrar R1.

$$R_1 = \frac{|\Delta v_\infty|}{|\Delta i|} - R_0$$

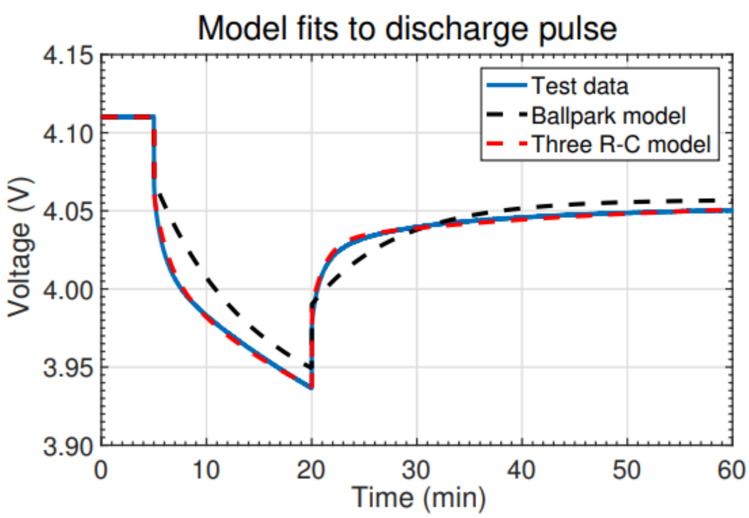
Passo 3: Calculando a Capacitância de Difusão C_1

O tempo que a tensão leva para relaxar até o estado estacionário é governado pela constante de tempo do circuito RC, que é $\tau_1 = R_1 C_1$. Uma regra prática comum na análise de circuitos é que um sistema atinge aproximadamente o estado estacionário em cerca de **cinco constantes de tempo**. Portanto, medimos o tempo de relaxação no gráfico e o igualamos a $5R_1C_1$.

$$C_1 \approx \frac{\textit{tempo de relaxação}}{5R_1}$$

Avaliando a Precisão do Modelo e o Compromisso de Engenharia

A melhor maneira de verificar a qualidade do nosso modelo parametrizado é **simulá-lo**. Usamos o mesmo perfil de corrente do teste como entrada para o modelo e comparamos a saída de tensão simulada com os dados de tensão reais medidos.



Como visto no gráfico, o modelo "aproximado" de um par RC (linha tracejada preta) captura a forma geral da resposta, mas não segue os dados reais (linha azul) perfeitamente. Um modelo mais complexo com três pares RC (linha tracejada vermelha), que requer métodos de otimização mais avançados para parametrizar, corresponde aos dados de teste quase que perfeitamente.

Isso ilustra um **compromisso de engenharia** fundamental: um modelo mais simples é mais fácil de parametrizar, mas menos preciso. Um modelo mais complexo oferece maior precisão ao custo de uma maior complexidade de parametrização e maior carga computacional no BMS. A escolha do modelo ideal depende das exigências específicas da aplicação.