2.3.2 Como os dados da célula são usados para encontrar os valores dos parâmetros do modelo dinâmico

Após aprender a coletar os dados de teste dinâmico, vamos descrever o processo de várias etapas necessário para usar esses dados para encontrar os valores dos parâmetros dinâmicos do modelo de célula Corrigido e Aprimorado (ESC). Este procedimento utiliza os dados de corrente e tensão, juntamente com a relação OCV que já determinamos, para ajustar todos os parâmetros restantes do modelo: eficiência coulómbica (η), capacidade total (Q), as resistências (R_0, R_j), as capacitâncias (C_j), e os parâmetros de histerese.

O processo geral é o seguinte:

1. Calcular η e Q diretamente dos dados do ciclo de calibração do teste.
2. Calcular o SOC para cada amostra e subtrair a OCV da tensão medida para isolar a resposta dinâmica.
3. Usar uma técnica de identificação de sistemas para encontrar as constantes de tempo dos pares RC.
4. Simular os estados internos do modelo (correntes RC, estados de histerese) com base em uma estimativa inicial para o parâmetro de taxa de histerese, γ.
5. Resolver para os parâmetros lineares restantes (R_0, R_j, M_0, M) usando um método de mínimos quadrados.
6. Calcular o erro de predição do modelo resultante.
7. Ajustar a estimativa de γ e repetir as etapas para minimizar o erro do modelo.

Etapa 1: Cálculo da Eficiência Coulômbica (η) e da Capacidade Total (Q)

O primeiro passo é usar os dados dos scripts de teste de calibração (scripts #2 e #3) para encontrar a eficiência e a capacidade relevantes para este conjunto de dados específico. O método é exatamente o mesmo que aprendemos para os testes de OCV:

- **Eficiência Coulômbica (η):** Como o ciclo de calibração completo (descarga para 0% e recarga para 100%) começa e termina no mesmo estado, a carga líquida efetiva é zero. Essa propriedade nos permite calcular a eficiência em cada temperatura de teste.

- **Capacidade Total (Q):** Usando a porção de descarga do teste de calibração (de 100% a 0% de SOC) e a eficiência agora conhecida, podemos calcular a capacidade total da célula.

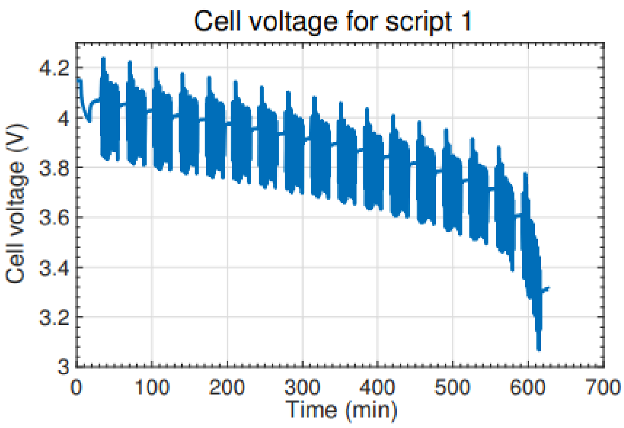
Etapa 2: Isolando o Componente de Tensão Dinâmica ($\tilde{v}[k]$)

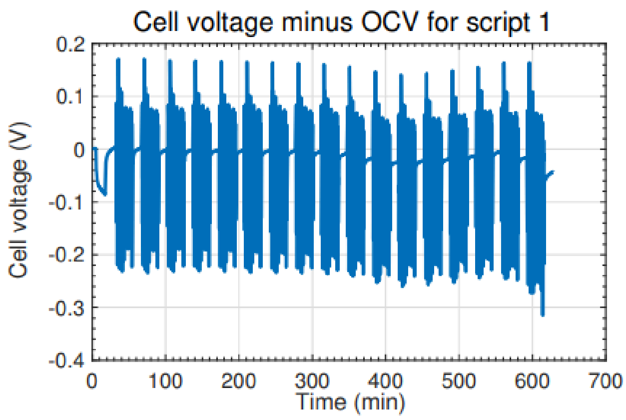
Com os valores de η e Q conhecidos, podemos agora calcular o SOC calibrado para cada ponto de dados no teste dinâmico principal (script #1). Uma vez que temos o SOC para cada amostra, podemos usar nosso modelo de OCV para encontrar a OCV correspondente em cada ponto no tempo.

Em seguida, subtraímos esta OCV da tensão terminal medida ($v[k]$) para obter a parte puramente dinâmica da tensão, que chamaremos de $\tilde{v}[k]$:

$$\tilde{v}[k] = v[k] - OCV(z[k], T[k])$$

Como visto nos gráficos, este processo remove a tendência de baixa da OCV, deixando um sinal centrado em torno de zero que representa apenas os efeitos da polarização (resistência e histerese) que desejamos modelar.





Etapa 3: Encontrando as Constantes de Tempo RC via Identificação de Subespaço

O próximo passo é determinar as constantes de tempo ($\tau_j = R_j C_j$) dos pares RC que modelam a difusão. Embora isso possa ser feito com otimização não linear, um método mais robusto e eficiente é a **identificação de sistemas de subespaço**. Esta é uma técnica avançada de álgebra linear que pode analisar a resposta do sistema (os dados de $\tilde{v}[k]$ e $i[k]$) e extrair as constantes de tempo do modelo linear subjacente em uma única etapa determinística. A derivação matemática deste método é complexa e está além do nosso escopo, mas o código de exemplo fornecido o implementa.

`http://mocha-java.uccs.edu/ECE5560`

O Laço de Otimização Iterativa (Etapas 4-8)

O parâmetro de taxa de histerese, γ, aparece de forma não linear nas equações do modelo, então não podemos resolvê-lo diretamente. Em vez disso, usamos um laço de otimização iterativo.

Etapas 4-5: Simulação dos Estados do Modelo com uma Estimativa para γ

Começamos com uma **estimativa inicial para** γ. Usando este valor e as constantes de tempo RC da Etapa 3, podemos simular as equações de estado do modelo para calcular os valores de todos os estados internos—as correntes dos resistores RC ($i_R[k]$) e os estados de histerese ($s[k]$ e $h[k]$)—para cada ponto no tempo ao longo do teste.

Etapa 6: Solução para Parâmetros Lineares com Mínimos Quadrados

Neste ponto, a tensão dinâmica não explicada, $\tilde{v}[k]$, pode ser escrita como uma combinação linear dos estados agora conhecidos e dos parâmetros de resistência e magnitude de histerese desconhecidos. Isso pode ser formulado como um grande sistema de equações matriciais da forma $Y = AX$. O vetor Y contém todos os valores de $\tilde{v}[k]$, a matriz A contém todos os valores dos estados simulados, e o vetor X contém os parâmetros desconhecidos (M, M_0, R_0, R_j).

Este sistema pode ser resolvido de forma muito eficiente para o vetor de parâmetros X que melhor se ajusta aos dados usando uma **solução de mínimos quadrados**, que em Octave/MATLAB é simplesmente o comando `X = A\Y`.

Etapas 7-8: Avaliação do Erro e Otimização de γ

Com um conjunto completo de parâmetros (baseado em nossa estimativa para γ), calculamos a predição de tensão do modelo completo, $\hat{v}[k]$, e a comparamos com a tensão real medida, $v[k]$. A qualidade do ajuste é quantificada calculando o **Erro Quadrático Médio (RMS)**.

O objetivo é encontrar o valor de γ que minimiza este erro RMS. Usamos um algoritmo de busca, como uma **busca por bisseção**, para ajustar iterativamente a estimativa de γ e repetir as etapas 5-7 até que o valor de γ que produz o menor erro RMS seja encontrado.