

## 1.4.5 Como calcular a energia e a potência disponíveis da célula

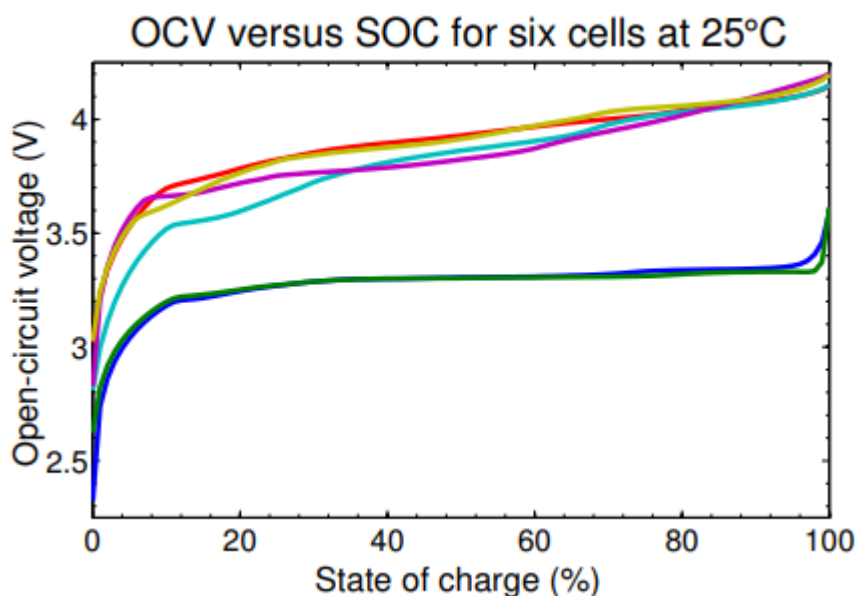
Continuando nossa análise do quarto requisito do BMS, o Gerenciamento de Desempenho, vamos focar nos métodos específicos usados para produzir duas das estimativas mais críticas: a quantidade de **energia** atualmente armazenada em uma célula de bateria e a quantidade de **potência** que ela pode fornecer ou aceitar com segurança no futuro próximo. Essas duas grandezas, embora relacionadas, descrevem aspectos muito diferentes da capacidade da bateria e são essenciais para que a aplicação hospedeira funcione corretamente.

### Calculando a Energia Disponível

Energia é uma medida da capacidade total de realizar trabalho, expressa em unidades como Watt-horas (Wh). A quantidade de energia útil restante em uma única célula pode ser calculada com uma relação integral razoavelmente simples.

$$E(t) = Q \int_{z_{\min}}^{z(t)} \text{OCV}(\xi) d\xi \approx Q V_{\text{nom}} \Delta z$$

Ela é igual à capacidade de carga total da célula (Q) multiplicada pela área sob sua curva de tensão de circuito aberto (OCV), integrada desde o estado de carga mínimo permitido até o estado de carga atual.



Embora essa integral possa parecer complexa, em um BMS prático ela não é calculada em tempo real. Em vez disso, os valores são pré-computados e armazenados em uma **tabela de consulta** (*lookup table*), permitindo que o BMS encontre a energia disponível com um esquema de busca e interpolação em tabela muito rápido e eficiente. Uma aproximação mais simples, embora menos precisa, para a energia também pode ser usada, que é o produto da tensão nominal da célula, sua capacidade nominal e a janela de SOC utilizável. Esta aproximação funciona razoavelmente bem para químicas com curvas de OCV muito planas, como o Fosfato de Ferro e Lítio (LFP), mas é menos precisa para químicas com perfis de tensão mais inclinados.

## Uma Nota sobre Energia Armazenada vs. Energia Disponível

Uma distinção crucial deve ser feita entre a energia total fisicamente armazenada em uma célula e a quantidade de energia que está praticamente disponível para extração a qualquer momento. A energia física total dentro de uma célula é uma propriedade de estado; ela não muda significativamente com a temperatura ou a taxa de descarga.

No entanto, sua experiência no mundo real pode lhe dizer que você consegue realizar muito menos trabalho com uma bateria fria do que com uma quente. Isso não ocorre porque a energia desapareceu. Uma célula fria tem uma resistência interna muito maior. Quando você drena corrente ( $I$ ) desta célula fria, a grande resistência ( $R$ ) causa uma grande queda de tensão interna ( $V_{\text{queda}} = I \times R$ ). Isso faz com que a tensão terminal externa da célula atinja o limite de corte mínimo muito mais cedo, mesmo que uma quantidade substancial de energia física permaneça armazenada em seu interior. Se você então aquecesse essa mesma célula novamente, seria capaz de extrair a energia restante.

Portanto, a equação para a energia total nos diz o que está fisicamente presente. A estimativa da potência disponível nos diz com que rapidez, ou mesmo **se**, somos capazes de extrair essa energia sob as condições atuais.

## Estimando a Potência Disponível em um Horizonte de Tempo Futuro

Potência, medida em Watts (W), é a taxa na qual podemos realizar trabalho. Quando um BMS calcula a potência disponível, ele está respondendo a uma pergunta fundamentalmente diferente de quando calcula a energia. A aplicação hospedeira não precisa saber a potência sendo usada neste exato instante (que pode ser simplesmente calculada como a tensão atual vezes a corrente atual); ela precisa planejar para o futuro imediato.

O BMS calcula a quantidade de potência constante que a célula pode sustentar durante um **horizonte de tempo futuro** definido ( $\Delta t$ ), que está tipicamente na ordem de 10 a 20 segundos. Esta é uma **estimativa de limite de potência em janela móvel**. A cada segundo, o BMS atualiza seu cálculo e informa ao hospedeiro: "Pelos próximos 10 segundos, você pode consumir com segurança a quantidade X de potência." Essa orientação contínua e prospectiva permite que a aplicação hospedeira gerencie suavemente seu consumo de energia sem violar os limites de segurança da célula.

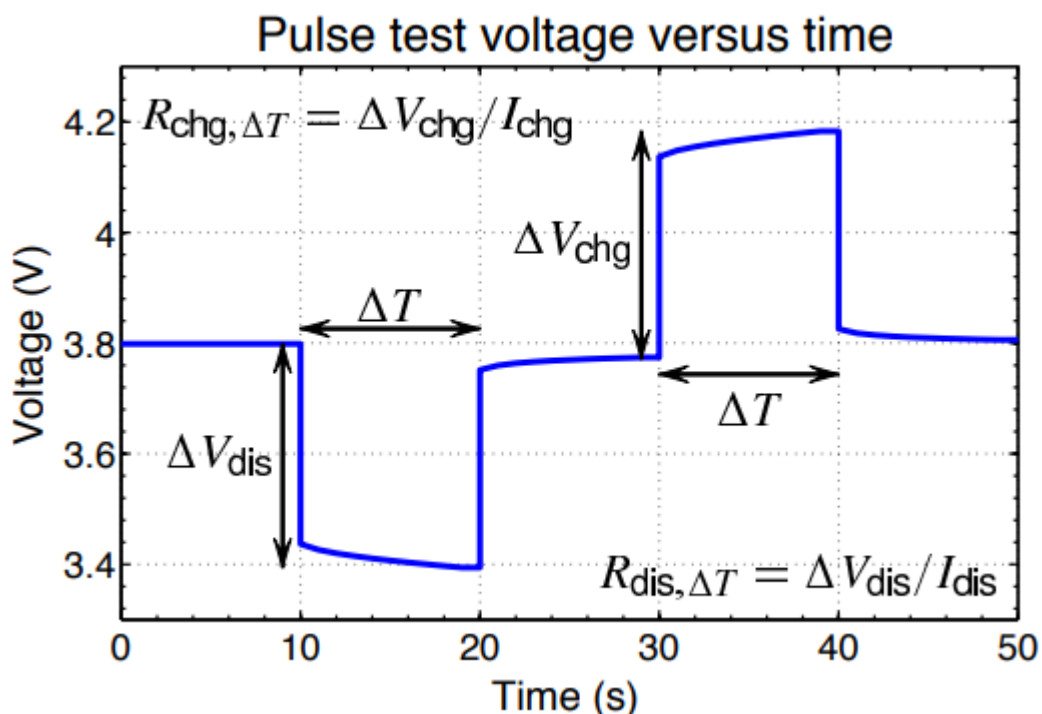
## Uma Metodologia Comum: O Teste HPPC

Um método simples e comum, embora limitado, para caracterizar uma célula a fim de estimar sua potência é o método de **Caracterização de Potência por Pulso Híbrido (HPPC)**. Este é um processo de duas etapas.

Passo 1: Caracterização em Laboratório para Encontrar a Resistência Efetiva

Primeiro, a célula é testada em um ambiente de laboratório controlado.

- A célula é submetida a um pulso de corrente de descarga conhecida pela duração exata do horizonte de tempo,  $\Delta t$ .
- A queda de tensão total durante este pulso ( $\Delta V_{\text{descarga}}$ ) é medida.
- A célula repousa e, em seguida, é submetida a um pulso de corrente de carga conhecida por uma duração de  $\Delta t$ .
- O aumento de tensão total durante este pulso ( $\Delta V_{\text{carga}}$ ) é medido.



A partir dessas medições, dois valores de resistência efetiva são calculados, que implicitamente levam em conta tanto os efeitos ôhmicos

instantâneos quanto os efeitos de difusão mais lentos ao longo do intervalo  $\Delta t$ .

Todo este teste é repetido em muitos estados de carga e temperaturas diferentes, e os valores de resistência efetiva resultantes são armazenados em grandes tabelas de consulta dentro do BMS.

## Passo 2: Cálculo dos Limites de Potência em Tempo Real

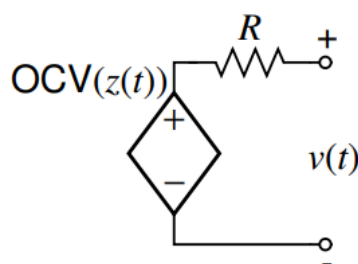
Em operação em tempo real, o BMS usa esses valores de resistência tabelados e um modelo de célula simplificado ( $V_{\text{terminal}} = \text{OCV} - I \times R$ ) para prever a corrente máxima que a célula pode sustentar sem que sua tensão viole os limites mínimo ( $V_{\text{min}}$ ) ou máximo ( $V_{\text{max}}$ ) pré-definidos.

- A **Potência Máxima de Descarga** é calculada com base na corrente máxima que pode ser drenada antes que a tensão terminal caia para  $V_{\text{min}}$ .

- For HPPC discharge power, assume simplified cell model

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

$$i(t) = \frac{\text{OCV}(z(t)) - v(t)}{R}$$



- Assume we're concerned only with keeping voltage between  $v_{\text{min}}$  and  $v_{\text{max}}$
- For discharge power, set  $R = R_{\text{dis}, \Delta T}$  and clamp  $v(t) = v_{\text{min}}$

$$P_{\text{dis}} = v(t)i(t) = v_{\text{min}} \frac{\text{OCV}(z(t)) - v_{\text{min}}}{R_{\text{dis}, \Delta T}}$$

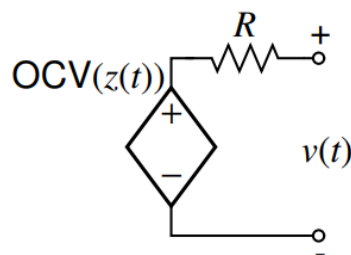
- A **Potência Máxima de Carga** é calculada com base na corrente máxima que pode ser injetada na célula antes que a tensão terminal suba para  $V_{\text{max}}$ .

- Using same simplified cell model

$$i(t) = \frac{\text{OCV}(z(t)) - v(t)}{R}$$

- For charge power, set  $R = R_{\text{chg}, \Delta T}$  and  $v(t) = v_{\text{max}}$

$$P_{\text{chg}} = v(t)i(t) = v_{\text{max}} \frac{\text{OCV}(z(t)) - v_{\text{max}}}{R_{\text{chg}, \Delta T}}$$



- Note that this quantity is negative: Can multiply by  $-1$  (take absolute value) if need to report as positive value
- Usually derate HPPC estimates since the equations assume initial equilibrium condition

Como este método se baseia em um modelo simplificado e em um teste realizado a partir de um estado de repouso, ele não é perfeitamente preciso em condições dinâmicas do mundo real. Por esta razão, é prática comum **subutilizar** as estimativas de potência calculadas pelo método HPPC, por exemplo, multiplicando o resultado por um fator de segurança de 0,9. Isso fornece uma margem de segurança, mas também limita artificialmente o desempenho do pacote de bateria. Métodos melhores e mais dinâmicos para a estimação de potência, que serão abordados no quinto curso desta especialização, podem reduzir a necessidade de tal subutilização.