

# MODELOS ELÉTRICOS E ENERGÉTICOS PARA BATERIAS

Existem diversos modelos para estudos de sistemas armazenamento de energia em baterias, que podem incluir modelos complementares para simulação conjunta dos sistemas de controle e de gerenciamento, assim como ter foco tanto no comportamento elétrico como no energético. Os itens a seguir apresentam diferentes abordagens da modelagem, independentes e complementares.

## 6.1 MODELOS ELÉTRICOS GENÉRICOS

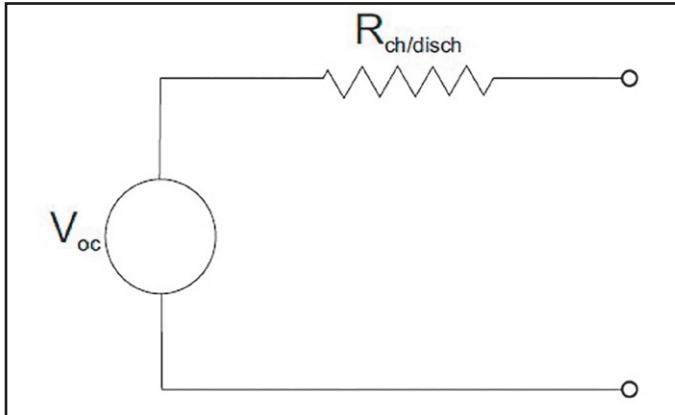
Os modelos elétricos podem ser desenvolvidos de forma genérica, representando os fenômenos eletroquímicos que ocorrem em qualquer bateria durante a carga e a descarga de energia. Esses modelos servem tanto para representação de produtos não padronizados como para levantar parâmetros específicos de interesse. Os modelos típicos se utilizam de componentes elétricos passivos e ativos (Rufer, 2017), apresentados a seguir.

### 6.1.1 Modelo $R_{int}$

O modelo  $R_{int}$ , ilustrado na Figura 6.1, é o mais simples, considerado apenas um valor médio de resistência para carga e descarga de energia. A tensão de

circuito aberto,  $V_{oc}$ , é constante. Esse modelo pode ser considerado para simulações nas quais a energia disponível não é limitada e os transientes podem ser negligenciados (Rufer, 2017).

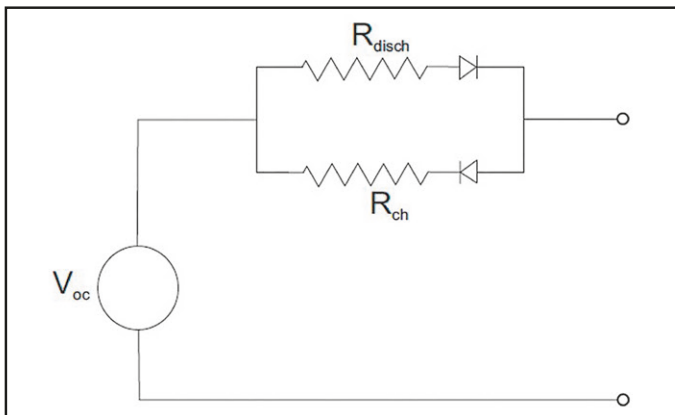
Figura 6.1 Modelo elétrico Rint (Rufer, 2017)



### 6.1.2 Modelo de Thévenin Modificado

A Figura 6.2 apresenta um modelo de Thévenin modificado, que pode ser entendido como uma versão evoluída do modelo  $R_{int}$ , pois também só faz uso de resistência para a análise, com o diferencial de adotar resistores independentes para a carga e a descarga, tornando suas correntes e perdas distintas (Nikdel & others, 2014).

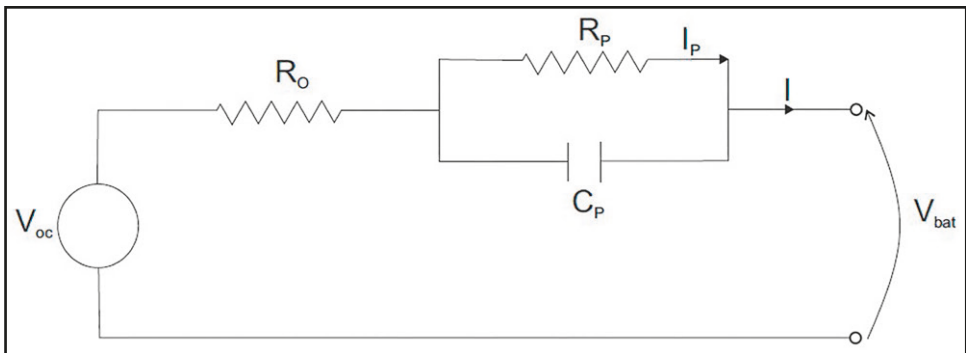
Figura 6.2 Modelo de Thévenin modificado (Nikdel & others, 2014)



### 6.1.3 Modelo Thévenin

O modelo de Thévenin (Figura 6.3) possui um par de componentes RC (em paralelo) associados em série a uma resistência característica da célula. Desta forma é possível se considerar os efeitos da dinâmica da tensão no terminal da bateria (Rufer, 2017).

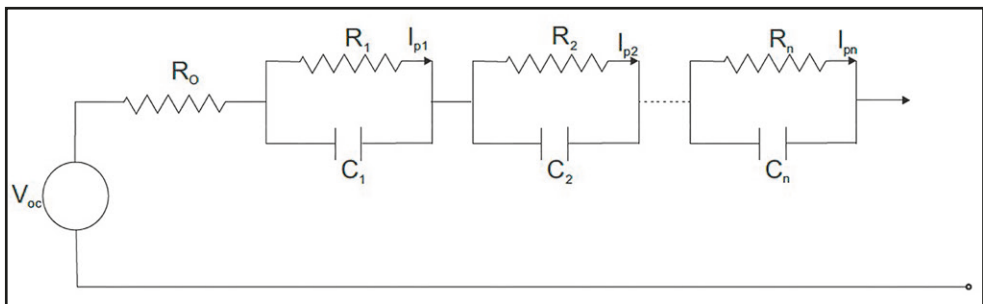
Figura 6.3 Modelo Thévenin (Rufer, 2017)



### 6.1.4 Modelo de redes RC

Este modelo é uma forma estendida do Thévenin e é representado por uma série de elementos RC em série, responsáveis por modelar de forma independente as quedas de tensão internas da bateria. A quantidade de pares RC é escolhida de acordo com as necessidades de detalhe e de velocidade de cálculo (Rufer, 2017).

Figura 6.4 Modelo de redes RC (Rufer, 2017)



## 6.2 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DA BATERIA

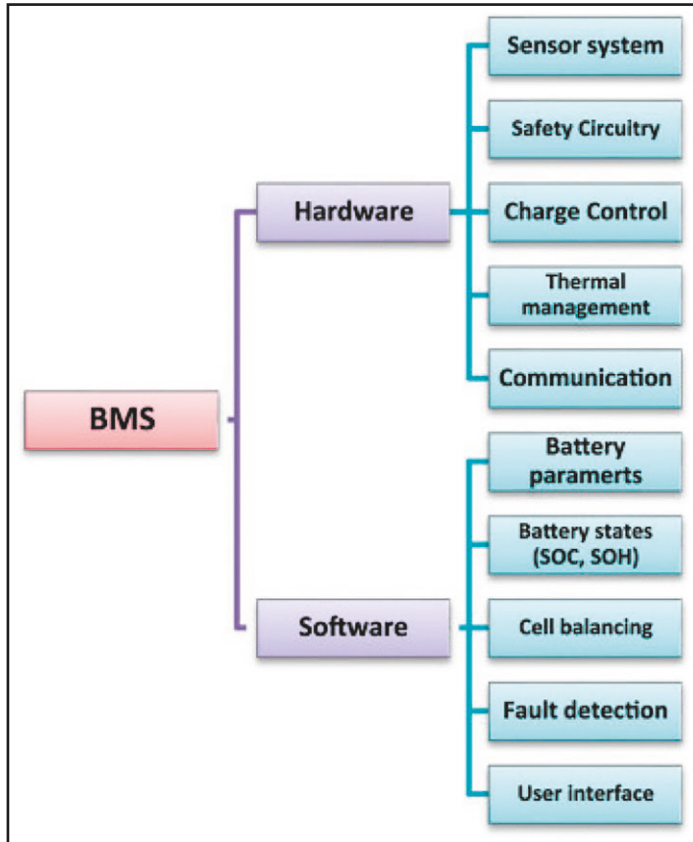
A operação e a vida útil da bateria dependem de diversos fatores, tais como: temperatura de operação, estado de carga, corrente de carga e descarga, estado de saúde da bateria, entre outros. Esses parâmetros são controlados e monitorados por meio do sistema de gerenciamento da bateria (*Battery Management System* - BMS), sendo o seu aprimoramento diretamente correlacionado a uma operação mais segura, confiável e eficiente (Rahimi-Eichi, Ojha, Baronti, & Chow, 2013), que pode impactar na viabilidade econômica do projeto.

Os sistemas de gerenciamento não apenas controlam os parâmetros da bateria, mas também fazem a estimativa de seu estado de carga e de saúde. A estimativa correta desses parâmetros é extremamente importante para o bom funcionamento do sistema. Por exemplo, o conhecimento correto do estado de carga permite que a bateria opere dentro dos limites sugeridos para não acelerar seu envelhecimento. O envelhecimento é medido pelo estado de saúde, e se manifesta como uma perda na capacidade de armazenamento de energia e na redução da potência de carga e descarga.

Em (Mjølhus, 2017), os autores recomendam a operação da bateria entre os limites de estado de carga de 80 % e 20 %. Em (Wikner & Thiringer, 2018), os autores mostram que a operação das baterias acima do limite superior de estado de carga pode ser prejudicial para seu funcionamento, pois acelera seu envelhecimento.

De acordo com (Xing, Ma, Tsui, & Pecht, 2011) e (Hannan M. A., Lipu, Hussain, & Mohamed, 2017), o sistema de gerenciamento da bateria pode ser dividido em hardware e software, como ilustrado na Figura 6.5.

Figura 6.5 Sistema de gerenciamento de bateria (Xing, Ma, Tsui, & Pecht, 2011)



Dentre os recursos desse sistema, alguns aspectos se destacam no contexto atual (Hannan M. A., Lipu, Hussain, & Mohamed, 2017):

- Já existe técnica para monitorar a impedância da bateria durante sua operação, sem a necessidade de desligamento;
- Os circuitos de prevenção existentes para evitar o superaquecimento, sobrecarga e sobredescarga ainda têm bastante espaço para evolução, podendo prover melhor confiabilidade e durabilidade das baterias;
- O controle da carga e descarga das células é feito por meio do método da corrente e tensão constante, aplicado célula a célula para equilibrar a quantidade de ciclos. Este balanceamento faz com que a degradação seja similar e previne casos de sobrecarga ou sobredescarga;

- O gerenciamento da temperatura é importante para melhorar a performance, durabilidade e confiabilidade das células. Os recentes avanços na comunicação sem fio trazem consigo a necessidade de um módulo de comunicação entre o carregador e as baterias;
- O software é o cérebro do sistema de gerenciamento, coordenando toda a parte de hardware instalada por meio da aquisição e estimativa de seus parâmetros. O software também é responsável pela detecção de faltas, que ainda contém o disparo de alarmes e o registro de um histórico. Por fim, deve possuir uma interface onde o operador possa obter informações sobre a bateria e sua operação de forma rápida e visual.

## 6.3 MODELOS PARA ANÁLISES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A modelagem computacional varia desde modelos simples até opções bastante sofisticadas, cada qual com sua aplicação. As seções seguintes ilustram alguns exemplos, com fins tanto energéticos como elétricos.

### 6.3.1 Modelos para Análises Energéticas

Os modelos para análises energéticas têm como grande diferencial a velocidade de execução, pois detalhes como chaveamento dos inversores e variações na frequência e tensão não são analisados, sendo úteis e mais adequados em diversas situações. Essas simplificações, entretanto, ainda podem manter certa sofisticação do modelo da bateria, assim como de outros recursos para análises energéticas.

Um dos softwares mais utilizados nesse tipo de análise é o Homer PRO, cujo cadastramento dos equipamentos de armazenamento é apresentado a seguir. Os dados gerais da bateria são ilustrados na Figura 6.6, onde os campos *Name*, *Abbreviation*, *Manufacturer*, *Notes* e *Chemistry* não possuem impacto direto na simulação, mas servem para identificação da bateria na simulação. Além de baterias, também podem ser selecionados supercapacitores, volantes de inércia ou usinas reversíveis. Há também opções do modelo de degradação a ser utilizado para o cálculo do limite da vida útil e da referência da profundidade de descarga. Por fim, o usuário informa as características de perda por ciclo e das correntes máximas de carga e de descarga.

Figura 6.6 Dados gerais de baterias (HOMER Energy LLC, 2019)

Li-ion Generic 1kWh - this item is in your library.

General | Functional Model | Temperature vs. capacity | Cycle lifetime | Temperature vs. lifetime | Thermal | Defaults

Name: Li-ion Generic 1kWh Last Modified: 7/9/2018 5:48:15 PM

Abbreviation: LI ASM

Manufacturer: Generic

Notes:  
The Generic 1 kWh Li-Ion [ASM] is an example battery with a 1 kWh nominal capacity that uses HOMER's new Modified Kinetic Model. This example battery includes rate dependent losses, temperature dependence on capacity, cycle lifetime estimation using Rainflow Counting, and temperature effects on calendar life.

Requires one minute timestep

Energy Model: Modified Kinetic Model; Storage type: Battery; Chemistry: Li-Ion

Calculate end of life by:  
 Sum of calendar and cycling degradation  
 Calendar or cycling degradation, whichever is greater

Cycling degradation uses battery depth of discharge based on:  
 Nominal battery capacity  
 Degraded battery capacity

Other round-trip losses (%): 8.00  
 Max. Charge Rate (A/Ah): 0.00  
 Max. Charge Current (A): 270.00  
 Max. Discharge Current (A): 810.00

As quatro abas seguintes permitem o cadastramento de curvas de resposta, e dados associados, de diferentes parâmetros do sistema de armazenamento desejado:

- Modelo funcional (Figura 6.7) – São informados os pontos da curva de capacidade de descarga pela potência solicitada e da tensão nominal em vazio. A curva resultante será utilizada nas simulações realizadas e permite, imediatamente, o cálculo dos valores de capacidade máxima, da taxa constante, da relação de capacidade e da resistência-série;
- Capacidade relativa pela temperatura (Figura 6.8) – Os dados para a formação da curva e as restrições operativas máxima e mínima permitem ao programa se adequar às variações de capacidade da bateria causadas pela temperatura, assim como restringir seu uso dentro dos limites especificados;
- Ciclo de vida (Figura 6.9) – A modelagem do ciclo de vida permite ao programa estimar a durabilidade da bateria conforme seu uso em termos de profundidade de descarga, não se limitando a pontos realmente testados ou à fixação de uma profundidade única de operação;
- Vida útil pela temperatura (Figura 6.10) – Estes dados se referem à expectativa de vida da “estrutura” da bateria de acordo com a temperatura. Esta informação nem sempre é disponibilizada pelo fabricante e pode não ser

útil em algumas aplicações, pois, em geral, a limitação de uso do sistema se dá pelo uso intensivo, tendo sua vida limitada pela frequência de uso e por grandes profundidades de descarga.

Figura 6.7 Capacidade por potência de descarga (HOMER Energy LLC, 2019)

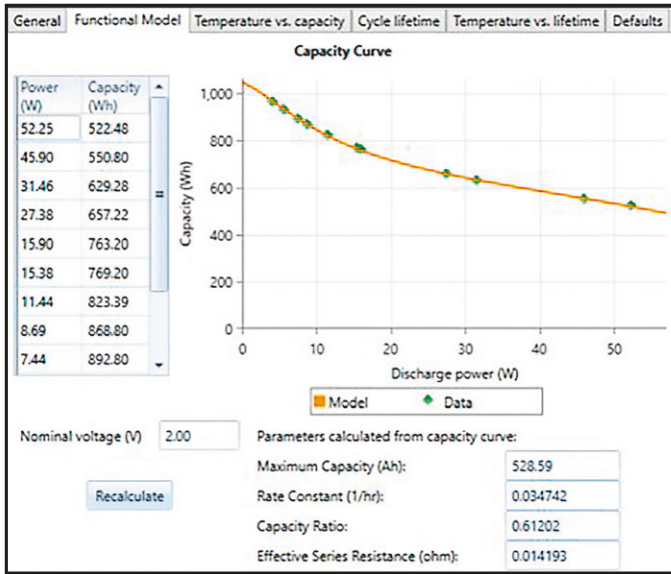


Figura 6.8 Capacidade relativa pela temperatura de operação (HOMER Energy LLC, 2019)

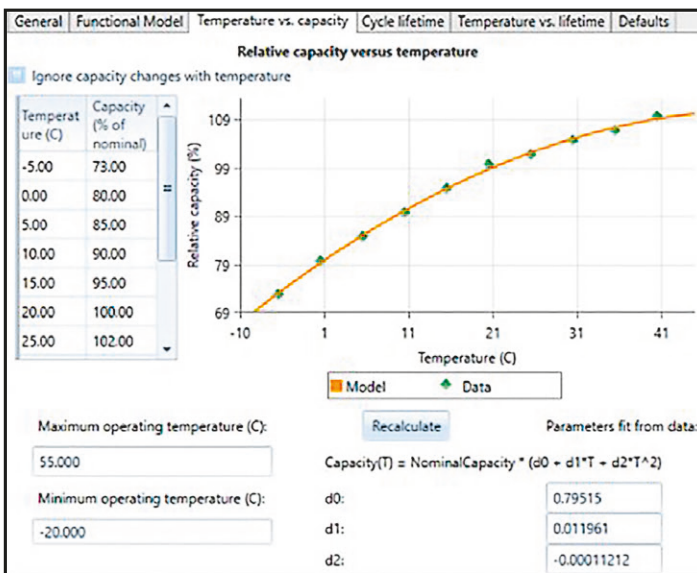




Figura 6.9 Ciclo de vida por profundidade de descarga (HOMER Energy LLC, 2019)

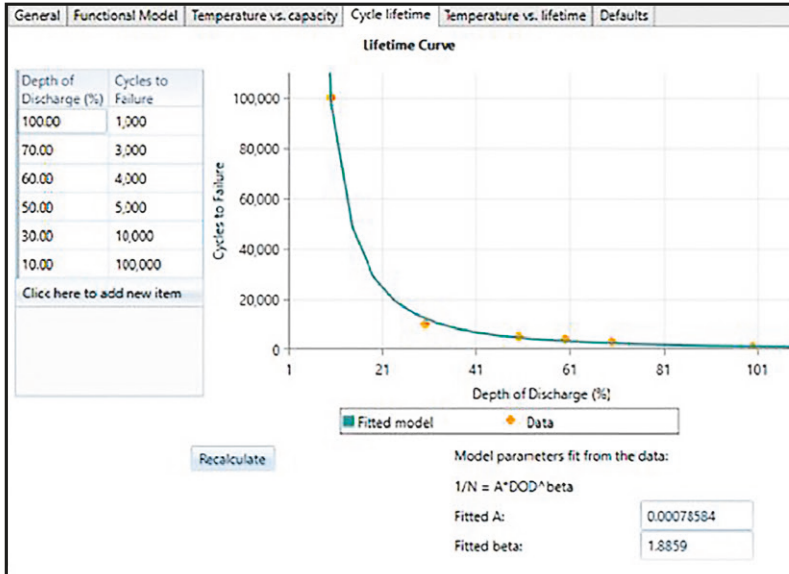
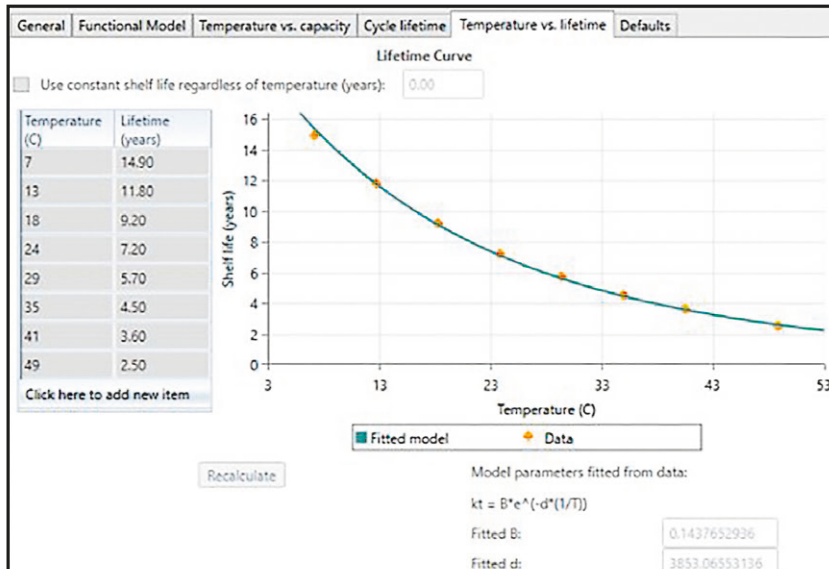


Figura 6.10 Vida útil pela temperatura (HOMER Energy LLC, 2019)



Por fim, na última aba são cadastrados os dados padrão da bateria, ilustrados na Figura 6.11. As informações solicitadas se referem aos custos (de instalação, reposição, manutenção e operação), à quantidade de células, com a organização

de seu arranjo série-paralelo, e aos dados de carregamento (inicial, operacional mínimo e degradação máxima).

Figura 6.11 Dados padrão (HOMER Energy LLC, 2019)

| Quantity | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/year) | Search Space |
|----------|--------------|------------------|---------------|--------------|
| 1        | \$300.00     | \$300.00         | \$10.00       | 0            |
|          |              |                  |               | 1            |

More...

Site Specific Input

String Size: 1.0 Voltage: 2 V

Initial State of Charge (%): 100.00

Minimum State of Charge (%): 40.00

Capacity degradation limit (%): 20.00

Fixed bulk temperature (C): 20.00  
 Lumped thermal model:  
 Conductance to ambient (W/K): 10.00  
 Specific heat capacity (J/kg-K): 800.00

Minimum storage life (yrs): 4.00  
 Use String Size

Maintenance Schedule...

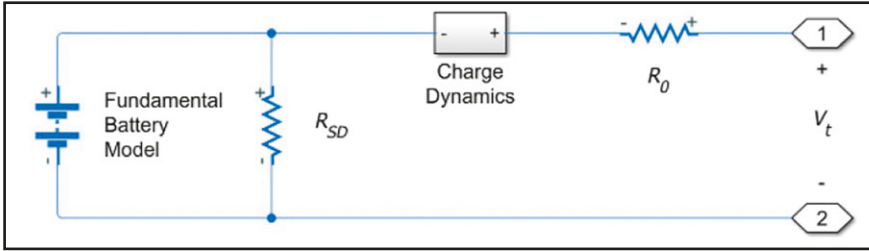
### 6.3.2 Modelos para Análises Elétricas

Uma das ferramentas computacionais mais utilizadas para análises elétricas é o *Matlab* (MathWorks, 2020), onde é possível tanto implementar modelos novos com total liberdade, como utilizar bibliotecas já desenvolvidas, como o Simscape. A seguir são descritos dois dos modelos existentes como exemplo.

#### Comportamento da bateria de íon de lítio

A Figura 6.12 apresenta um modelo onde a bateria é representada por duas resistências:  $R_{SD}$  para as perdas por autodescarga (dependente tanto da tecnologia como do fabricante) e  $R_0$  para as perdas devidas à carga e descarga. Neste caso, a tensão de operação da bateria  $V$  é determinada pela equação (6), na qual  $V_0$  é a tensão quando a bateria está totalmente carregada em circuito aberto,  $\beta$  é uma constante que relaciona a capacidade da bateria com sua tensão e SOC é o estado de carga atual da bateria.

Figura 6.12 Modelo computacional de bateria com autodescarga (MathWorks, 2019)



$$V = V_0 \frac{SOC}{1 - \beta(1 - SOC)} \quad (6)$$

O modelo consegue estimar a deterioração causada pelos ciclos de uso através dos multiplicadores  $\lambda_{AH}$ ,  $\lambda_{R0}$  e  $\lambda_{V1}$ , que estão relacionados respectivamente à capacidade, resistência interna e tensão (equações 7, 8 e 9).

$$\lambda_{AH} = 1 - k_1 * N^{0.5} \quad (7)$$

$$\lambda_{R0} = 1 - k_2 * N^{0.5} \quad (8)$$

$$\lambda_{V1} = 1 - k_3 * N \quad (9)$$

Os valores padrão para os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são, respectivamente,  $1e-2$ ,  $1e-3$  e  $1e-3$ . O número de ciclos completos de descarga ( $N$ ) das equações 7, 8 e 9 é calculado pela equação 10.

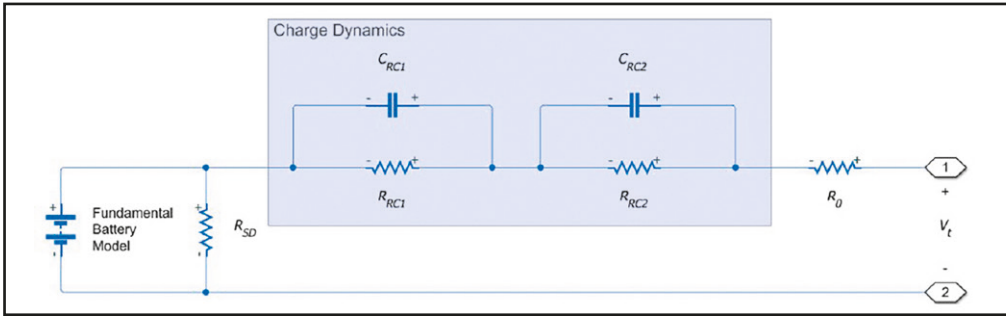
$$N = N_0 + \frac{1}{AH} \int_0^t \frac{i(t)H(i(t))}{\lambda_{AH}(t)} dt \quad (10)$$

Onde  $AH$  representa a capacidade da bateria,  $H(i(t))$  é a corrente instantânea da bateria e é a função de Heaviside da corrente de saída da bateria, que retorna 0 (zero) para corrente negativa e 1 para corrente positiva.

A dinâmica de carga e descarga da bateria deve ser modelada como uma cascata de circuitos RC em paralelo, como ilustrado na Figura 6.13. O número de circuitos RC determina o número de constantes de tempo ( $\tau$ ) do circuito. O valor de  $C$  é determinado pela divisão entre o  $\tau$  preestabelecido e o  $R$  com que será modelado. Por exemplo, tendo um  $R$  de  $1 \text{ k}\Omega$  e um  $\tau$  de 1 milissegundo tem-se

um C de 1  $\mu\text{F}$ . Esse modelo é similar ao apresentado na Figura 6.4, mas com a resistência adicional  $R_{SD}$  em paralelo para incluir a autodescarga.

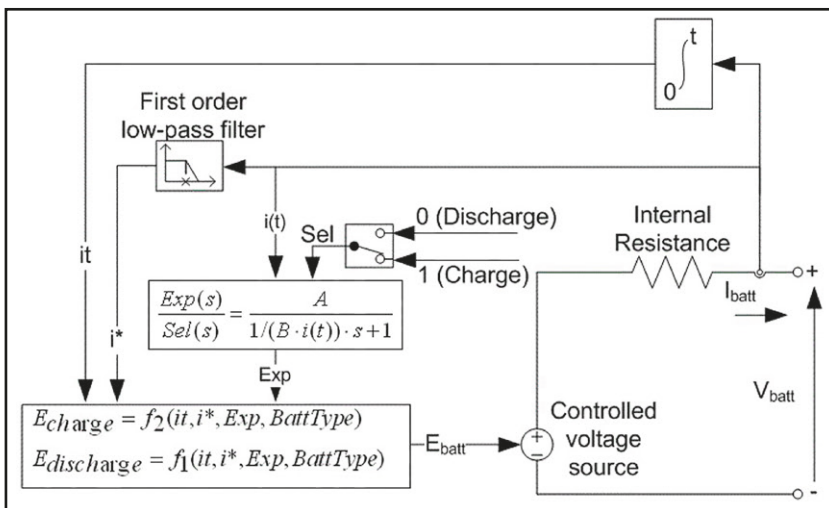
Figura 6.13 Modelo computacional de bateria com autodescarga e dinâmicas de carga e descarga (MathWorks, 2019)



### Modelo genérico de bateria

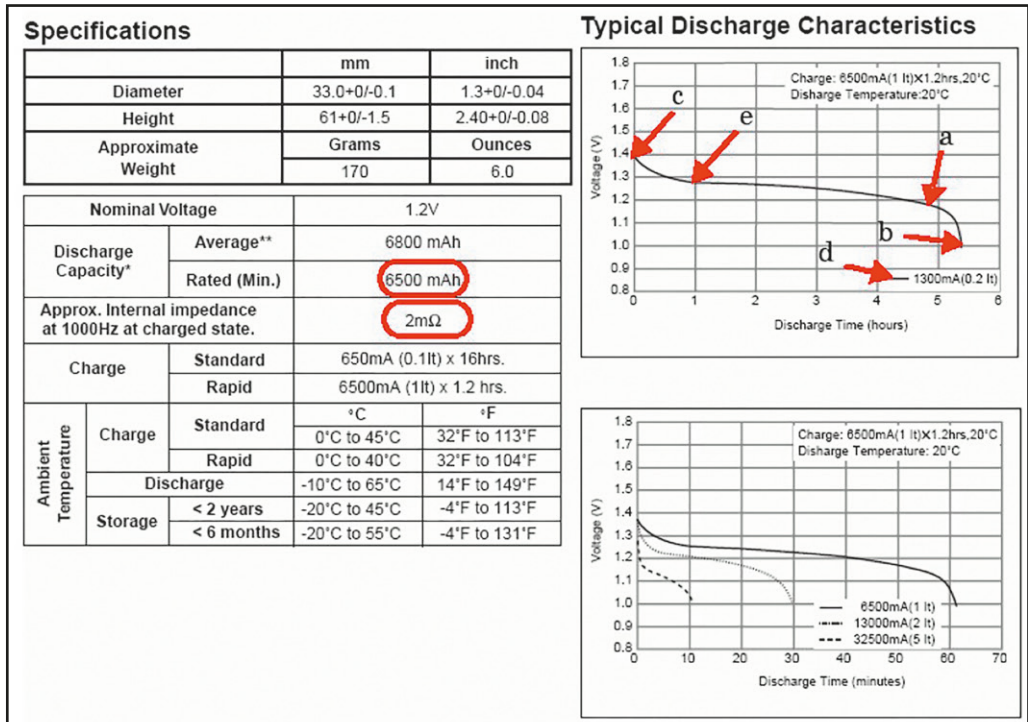
A Figura 6.14 ilustra um modelo genérico, capaz de representar outras tecnologias de bateria além da de íon de lítio. Este circuito se diferencia, principalmente, por ter uma fonte de tensão controlável, com as correntes de carga e descarga modeladas através de diversas equações específicas para cada tipo de bateria. Adicionalmente, também há equações para cálculo de temperatura e de envelhecimento, explanadas em detalhe em (MathWorks, 2017).

Figura 6.14 Circuito equivalente da bateria (MathWorks, 2017) incluindo envelhecimento e a temperatura de operação



Os coeficientes necessários ao modelo podem ser obtidos nos catálogos de baterias, como no exemplo da Figura 6.15, onde se destaca a corrente média de descarga de 6.500 mAh, a resistência interna de 2 mΩ e diversos valores da curva de descarga (por exemplo, a tensão de carga completa ‘c’ e a corrente nominal de descarga ‘d’.

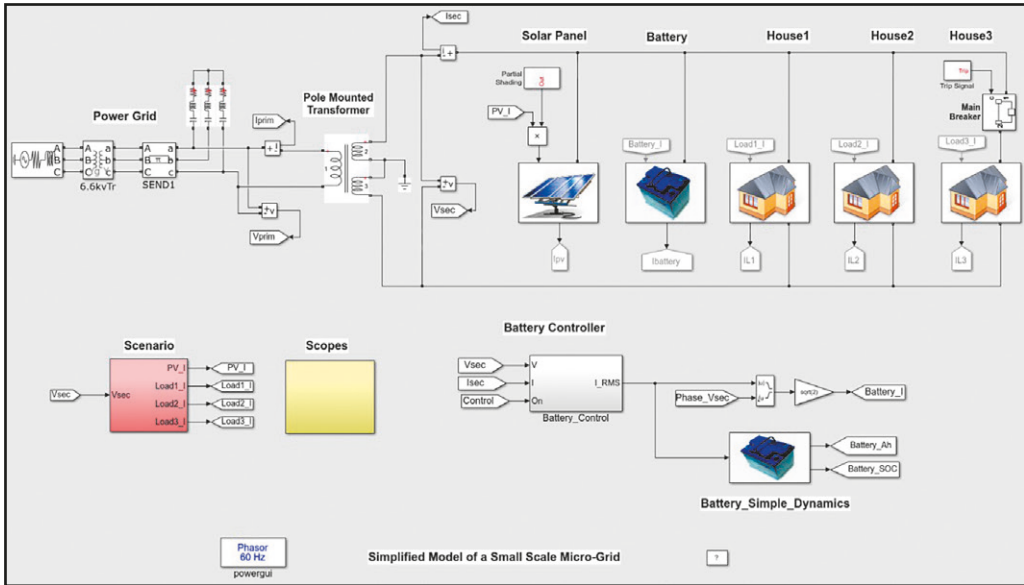
Figura 6.15 Especificação da bateria Panasonic NiMH-HHR650D (MathWorks, 2017)



## 6.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Um exemplo de aplicação realizado no MatLab é ilustrado na Figura 6.16. Este caso representa uma microrrede conectada ao sistema de distribuição e composta por três consumidores residenciais, um gerador fotovoltaico e um sistema de armazenamento. O objetivo do despacho do sistema de armazenamento é oferecer energia para a microrrede quando ela estiver com déficit de energia e carregar quando a geração fotovoltaica for maior do que a demanda, evitando ao máximo qualquer demanda à rede convencional.

Figura 6.16 Diagrama do modelo de microrrede do Matlab/Simulink



As residências possuem potência nominal de 2,5 kW, com demanda máxima coincidente às 19 h e às 22 h, como ilustrado na Figura 6.17. A Figura 6.18 e a Figura 6.19 apresentam, respectivamente, a curva do gerador fotovoltaico (de 5 kW) e a potência consumida/injetada na bateria de 1.000 Ah. Na análise se pode observar, por exemplo, que os picos das 9 h e das 19 h são atendidos pela geração fotovoltaica e pela bateria, enquanto que às 22 h o atendimento é exclusivo pela bateria.

Figura 6.17 Curva de demanda agregada dos consumidores residenciais

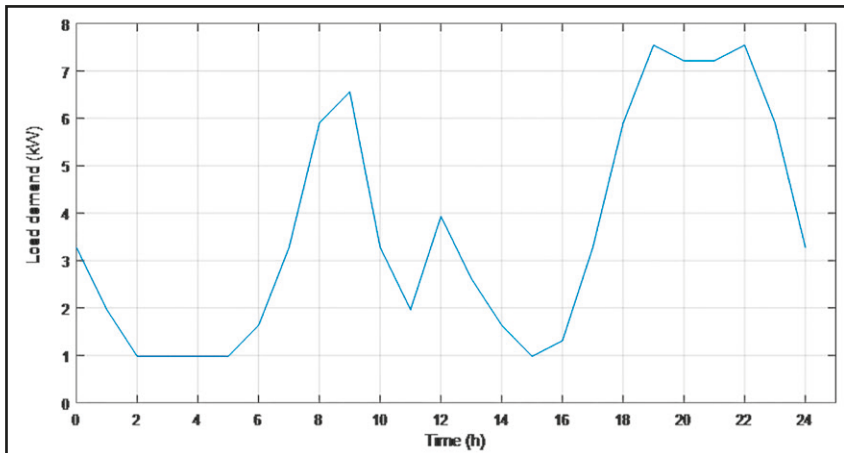


Figura 6.18 Curva de geração fotovoltaica

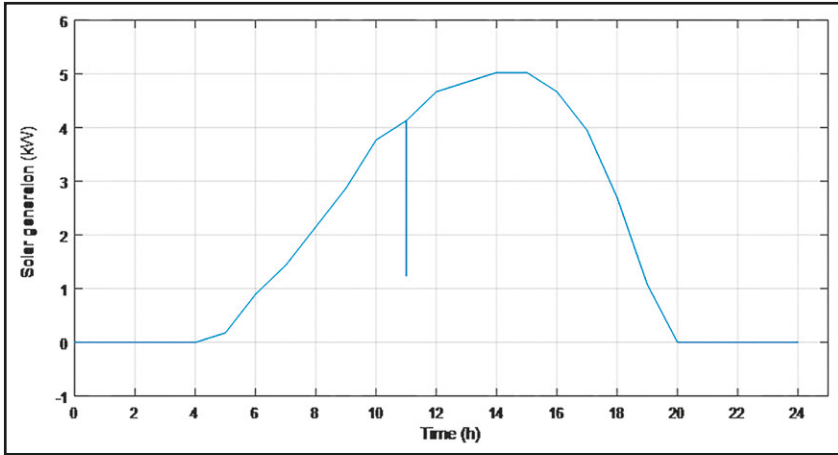


Figura 6.19 Despacho da bateria

