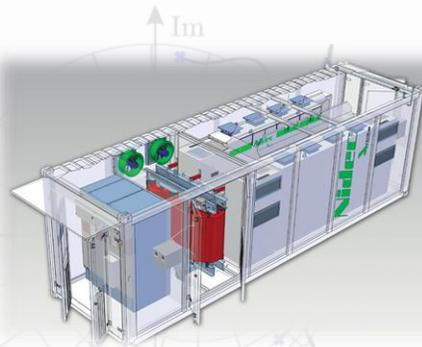




Modelos elétricos de baterias

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Tópicos a serem abordados

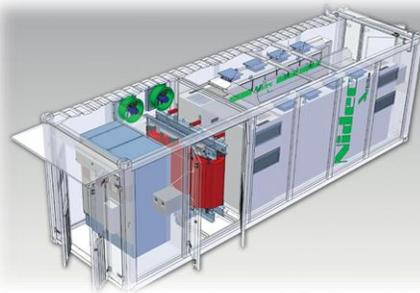
- Algumas definições importantes;
- Comportamento elétrico de uma bateria;
- Revisão sobre modelos de baterias.
- Simulação de baterias no PLECS.





Comportamento elétrico de uma bateria

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Definições importantes

- ❑ **Capacidade C:** quantidade de energia que pode ser recuperada do armazenador.

$$C = \int_0^t i(t) dt$$

- ❑ **Profundidade de descarga DoD:** Quantidade de eletricidade extraída do armazenador em relação a sua capacidade.

$$DoD = \frac{\int_0^t i_{dis}(t) dt}{C}$$

- ❑ **Estado de carga SoC:** Indica a quantidade de eletricidade disponível em relação a sua capacidade

$$SoC = \frac{C - \int_0^t i_{dis}(t) dt}{C} = 1 - DoD$$

Taxa de descarga

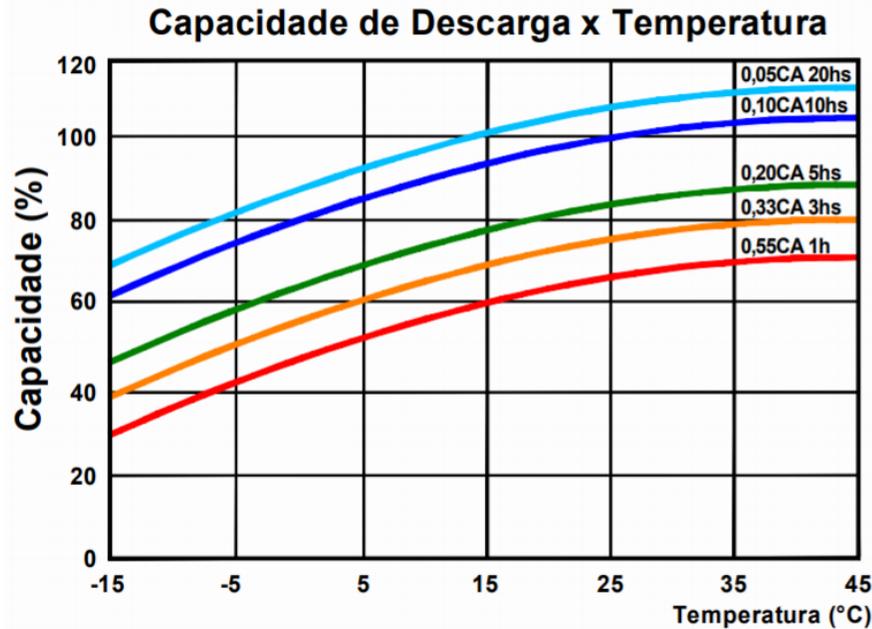
□ Taxa de descarga C_r

- Mede a taxa com que a bateria é descarregada;
- Razão entre a corrente de descarga e a corrente teórica que poderia ser entregue em 1 hora;
- Exemplo: Bateria de 60 Ah. Um se $C_r = 1 C$, significa que a bateria foi descarregada com uma corrente de 60 ampères. Se $C_r = 5$, significa que a bateria foi descarregada com uma corrente de 300 ampères.
- O valor máximo de C_r é definido pela química da bateria;
- C_r muito elevados tendem a afetar a vida útil da bateria!

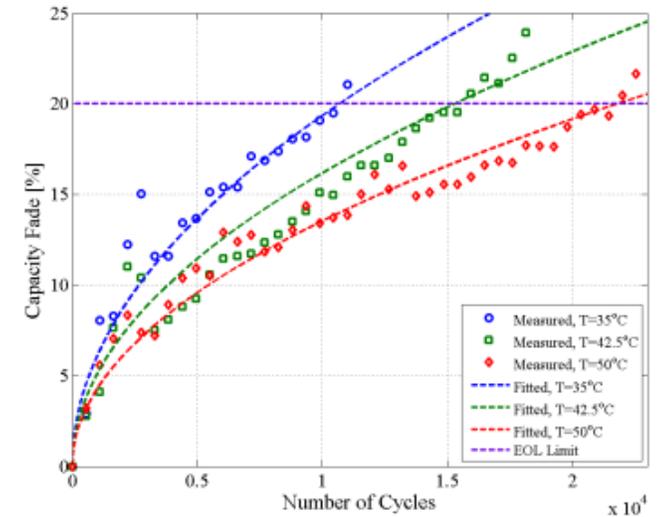
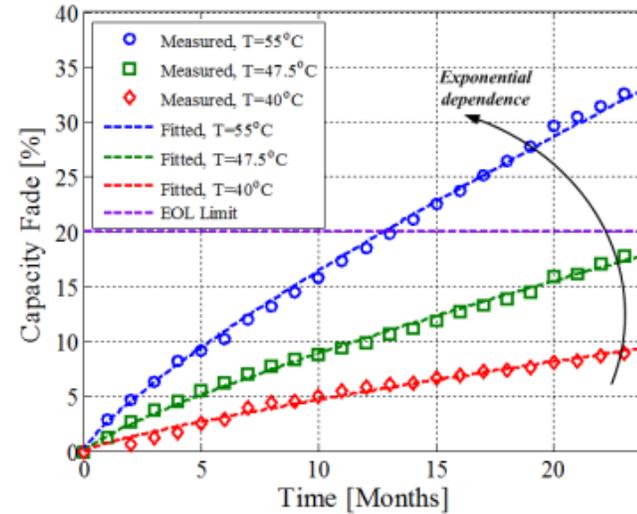
Alguns fatores que afetam a capacidade

- ❑ Regime de descarga: Capacidade cai a medida que o C_r aumenta;
- ❑ Temperatura: Capacidade cai a medida que a temperatura diminui;
- ❑ Tensão de corte: Capacidade cai a medida que a tensão de corte aumenta (geralmente V_{pe});
- ❑ Degradação: Capacidade cai a medida que a degradação aumenta;
- ❑ Degradação acontece mesmo que com a bateria ociosa!
- ❑ **Conclusão:** existe a capacidade real e a capacidade nominal da bateria (geralmente definida para um número de horas, temperatura e tensão final dos elementos)!

Alguns fatores que afetam a capacidade



Fonte: Moura. Manual técnico linha estacionária. Moura VRLA Série MVA.

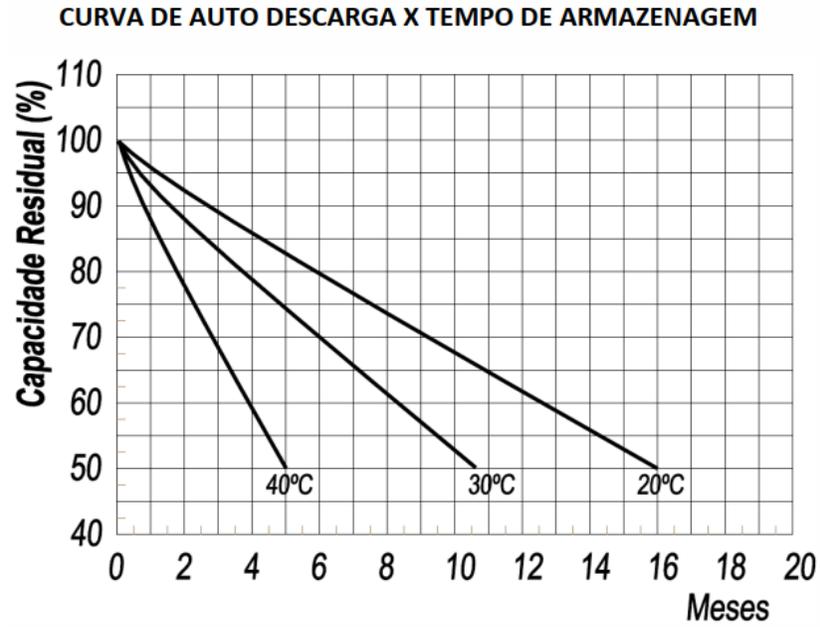


Fonte: D. I. Stroe. "Lifetime Models for Lithium Ion Batteries used in Virtual Power Plants". PhD Thesis. Aalborg University. 2014

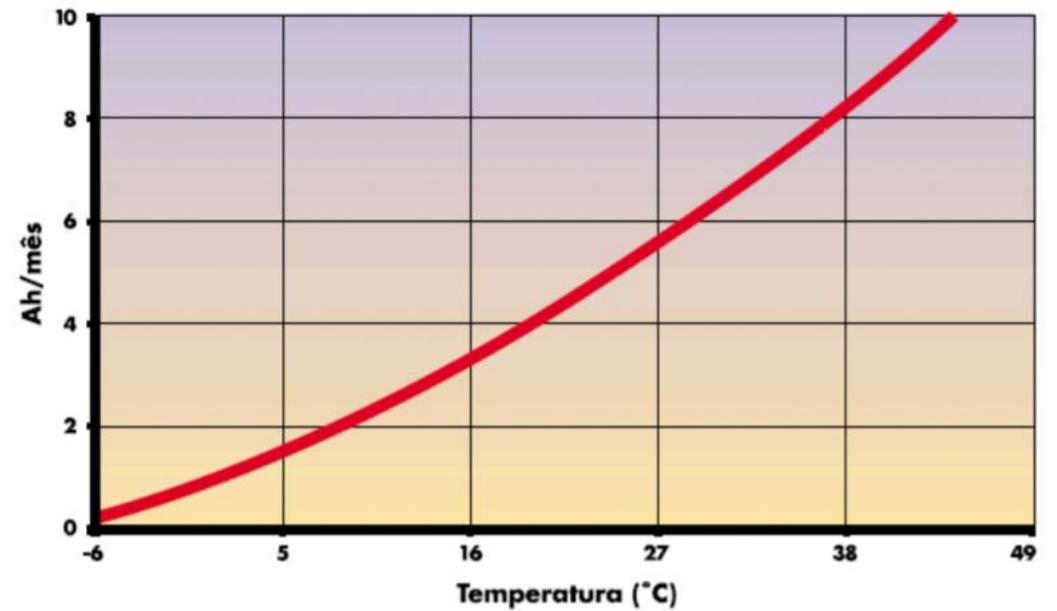
Taxa de autodescarga

- ❑ Descarga associada aos processos eletroquímicos no interior da bateria;
- ❑ Pode descarregar as baterias por completo dependendo do tempo ocioso;
- ❑ Processo dependente da temperatura!
- ❑ Mais acentuado nas baterias de chumbo ácido e químicas de sódio.

Taxa de autodescarga



Fonte: Moura. MFV, Manual Técnico - Linha Estacionária, 2019.

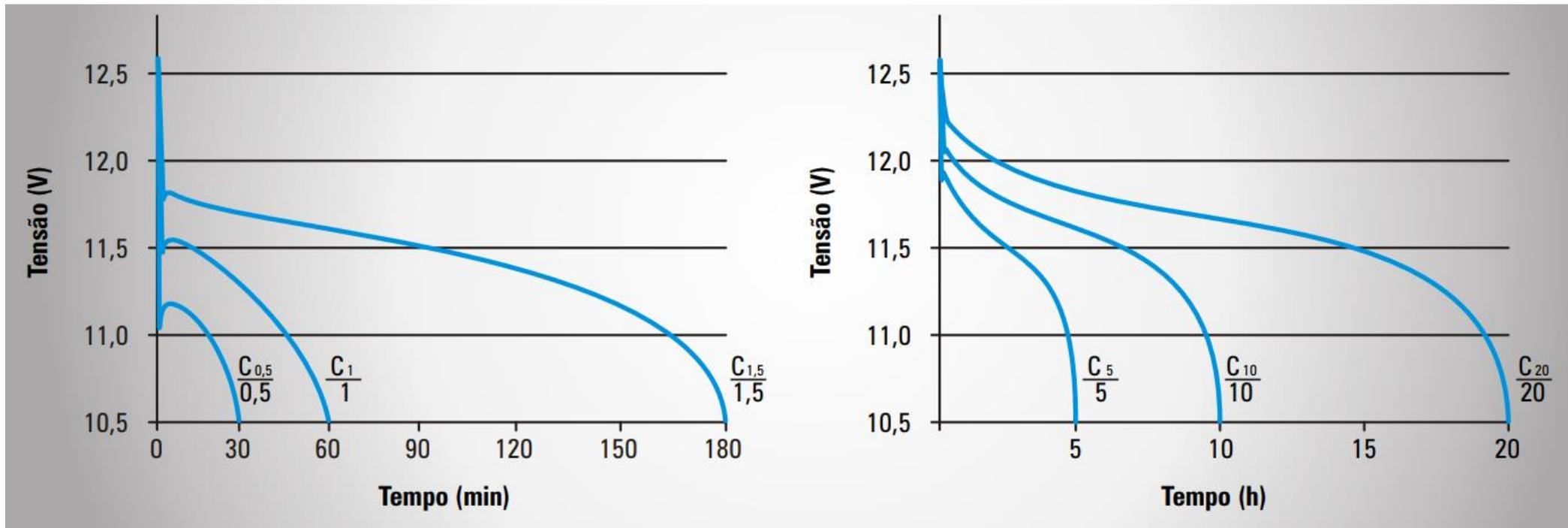


Fonte: Freedom. Manual técnico bateria estacionária.

Curvas de descarga de uma bateria

- ❑ Curva obtida para uma corrente de descarga constante!
- ❑ Tensão final ou tensão de corte V_c : menor valor de tensão nos terminais da bateria ao final de uma descarga completa;
- ❑ Equivalente ao mínimo estado de carga (valor mínimo depende do projeto);
- ❑ Se a bateria for descarregada além deste ponto → danos irreversíveis;
- ❑ Conclusão: Sistemas de carregamento devem monitorar a tensão da bateria!

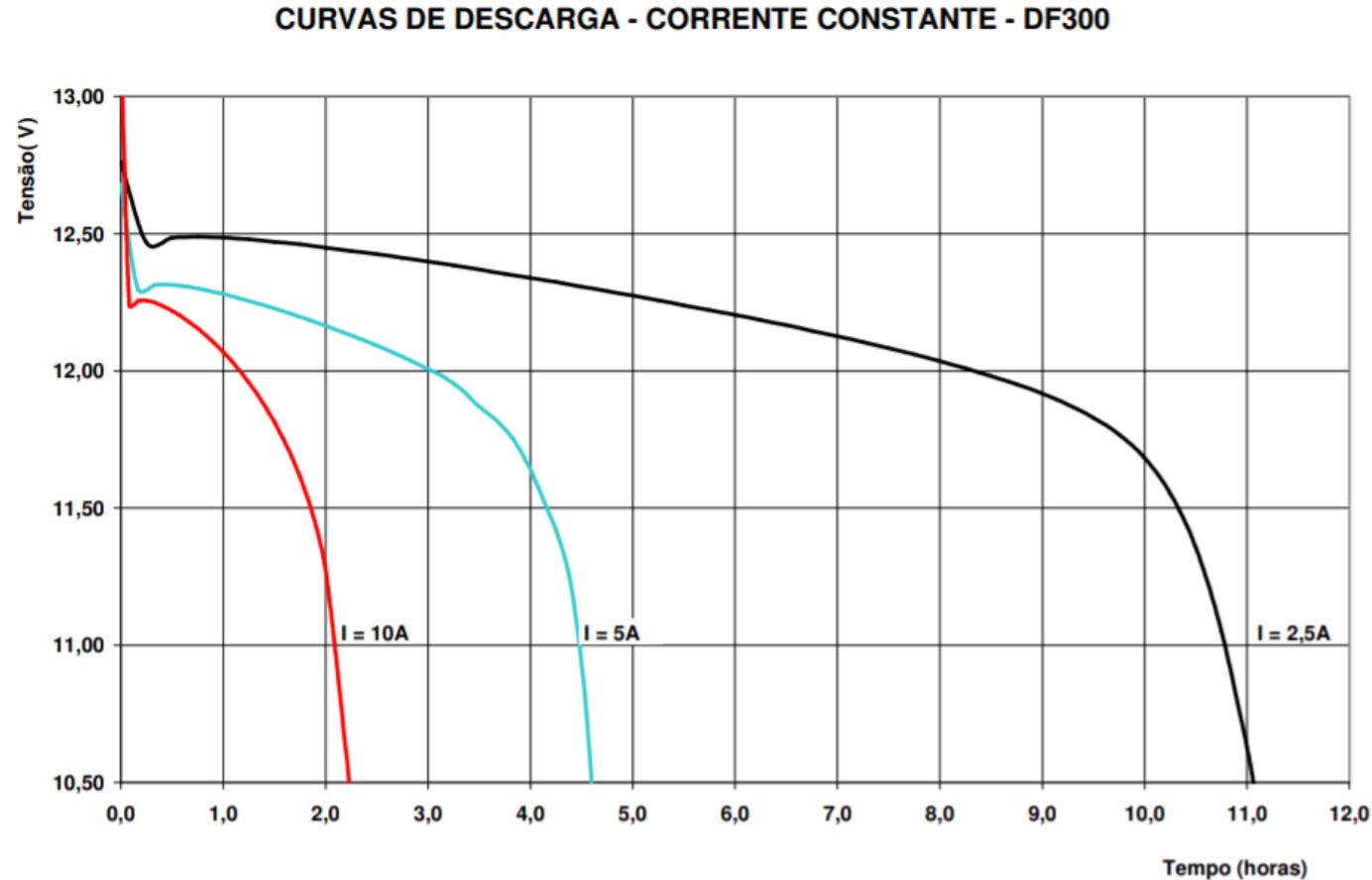
Exemplo: Curvas de descarga de uma bateria



Fonte: Moura. Manual Técnico Clean Nano.

Exemplo: Curvas de descarga de uma bateria

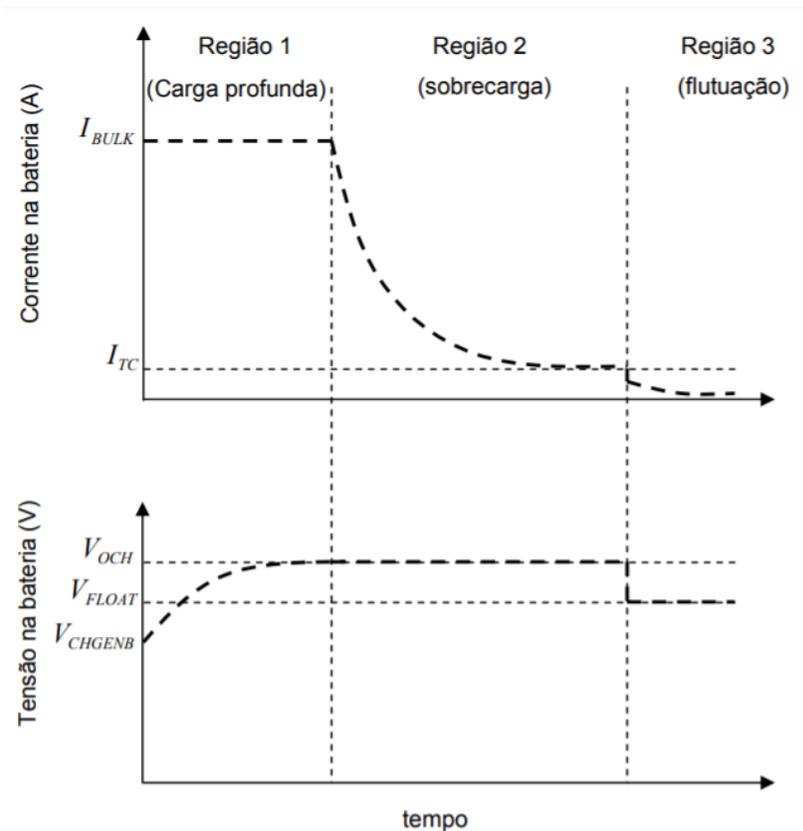
- “Coup de Fouet” → fenômeno de baterias de chumbo ácido



Fonte: Freedom. Manual técnico bateria estacionária.

Curvas de (re)carga de uma bateria

- Processo de carga é tipicamente dividido em 3 regiões.



Fonte: J. I. L Seguel. “Projeto de um Sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital”. Dissertação de mestrado. UFMG. 2009

Curvas de (re)carga de uma bateria

❑ Região de carga profunda

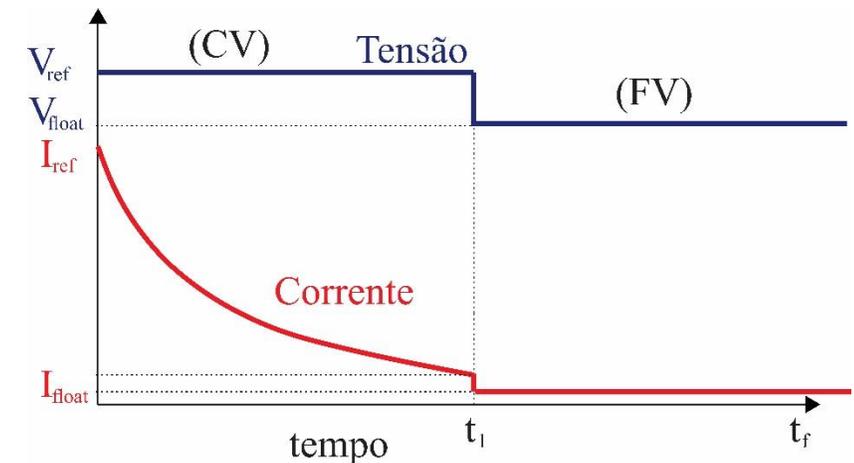
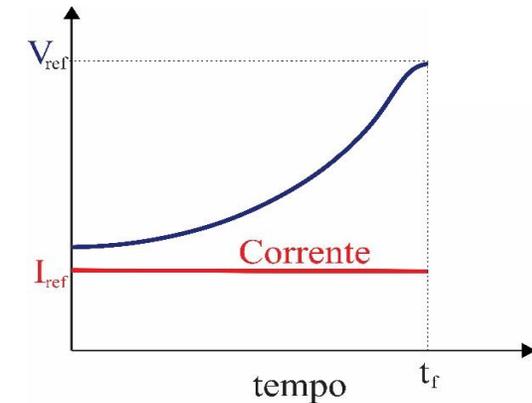
- “Corrente constante”;
- Limita o C_r ;
- Aumentar a energia armazenada na bateria;
- Monitoramento de temperatura!

❑ Região de sobrecarga

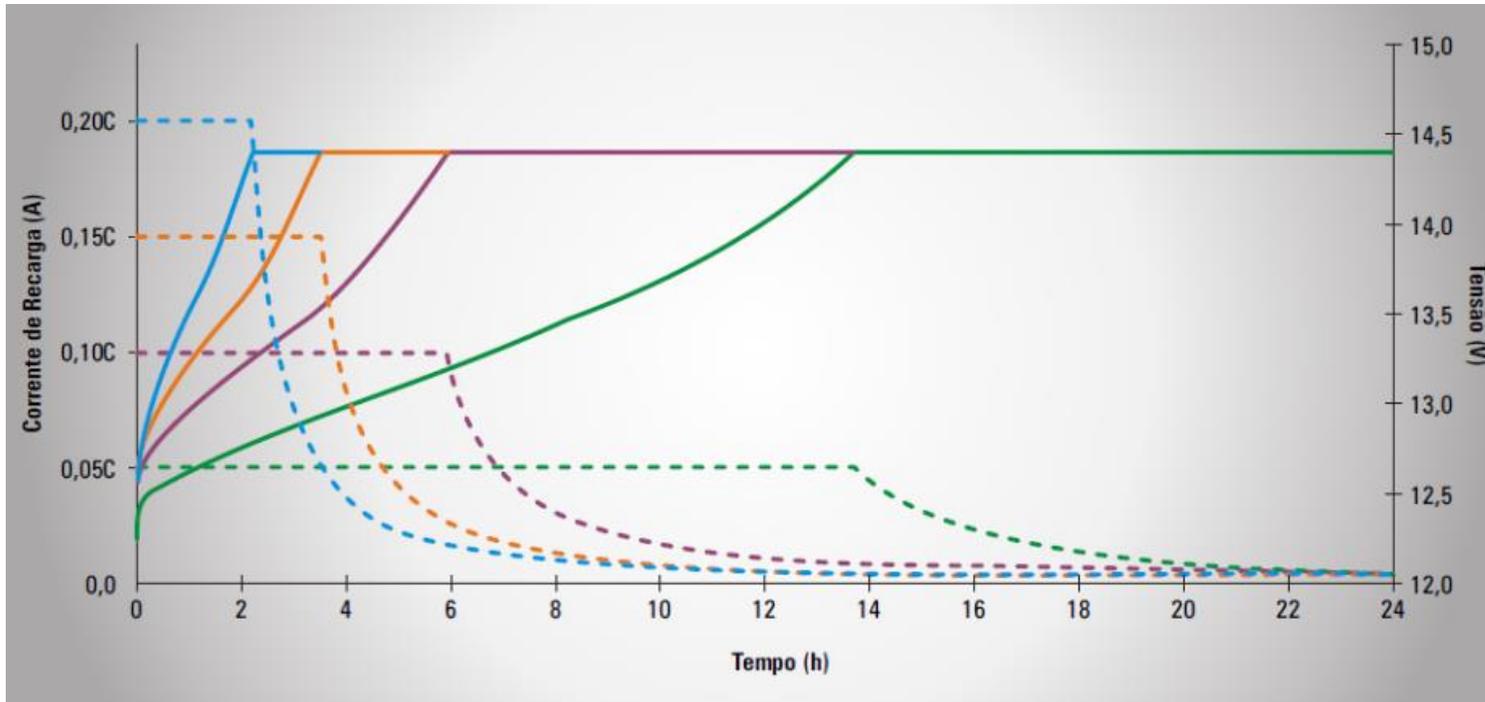
- Tensão constante V_{OC} ;
- Corrente vai apresentar uma queda exponencial;
- Valor final I_{TC} em torno de 1% da capacidade da bateria.

❑ Região de flutuação

- A tensão aplicada é reduzida para a tensão de flutuação V_f ;
- Tensão aplicada para compensar a autodescarga da bateria.

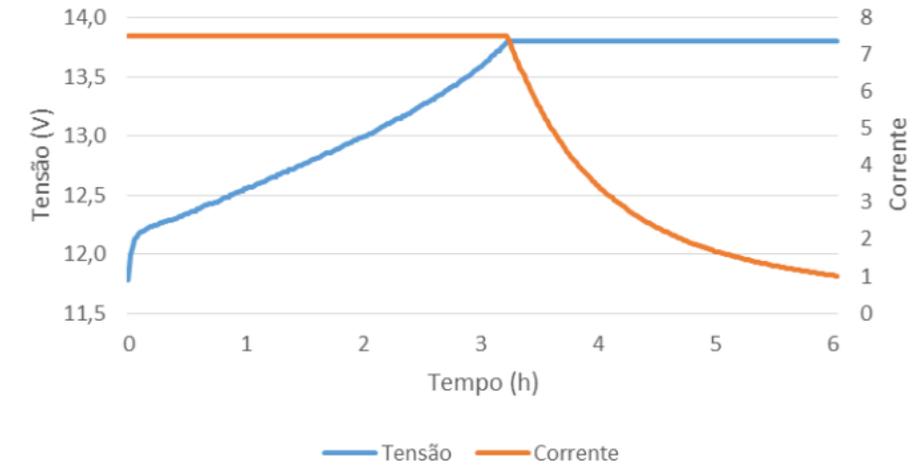


Exemplo - Curva de recarga



- Tensão de flutuação: 13,8V +/- 0,2V a 25°C
- Tensão de circuito aberto: 12,6V a 12,9V a 25°C
- Tensão de Recarga: 14,40 +/- 0,1V (2,4Vpe) a 25°C

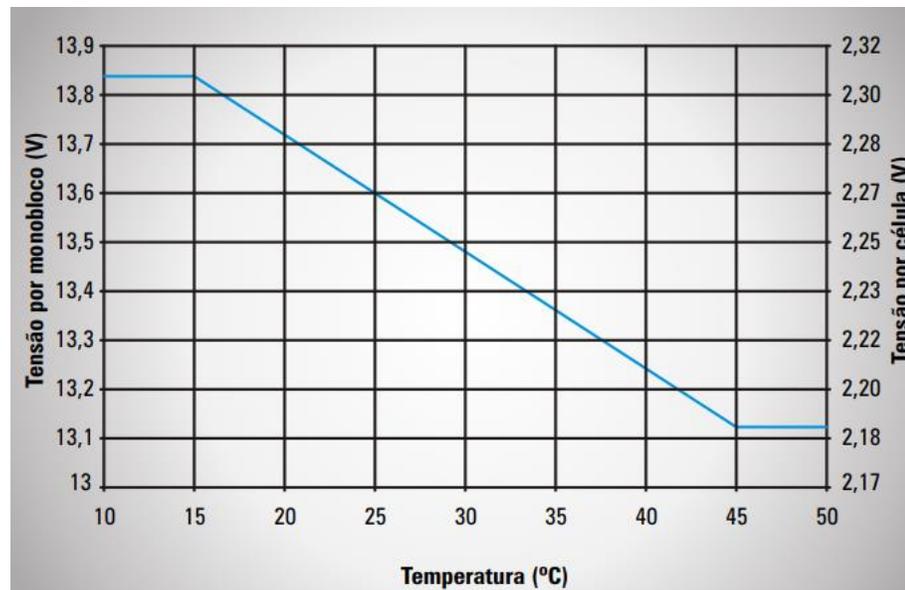
Curva de recarga na tensão de flutuação a 25°C



Fonte: Moura. Bateria estacionária Clean Nano. Moura.

Tensão de flutuação

- ❑ Tensão de flutuação é função da temperatura da bateria!
- ❑ Alguns sistemas apresentam uma entrada para um termopar que é instalado próximo as baterias.

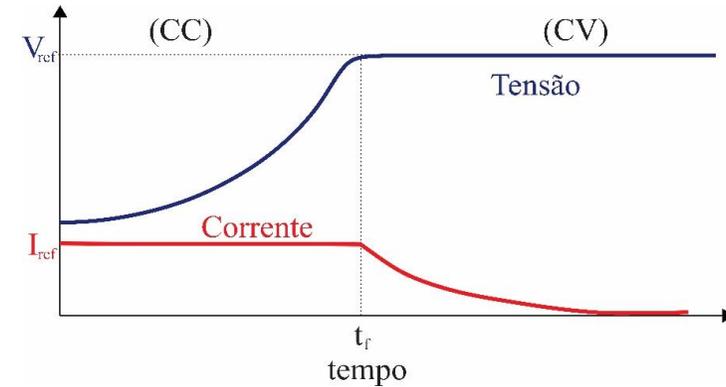


Fonte: Epever.

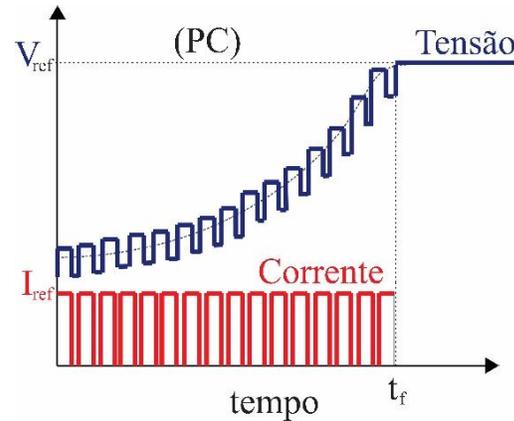
Fonte: Moura. Manual Técnico Clean Nano.

Procedimentos de carga práticos

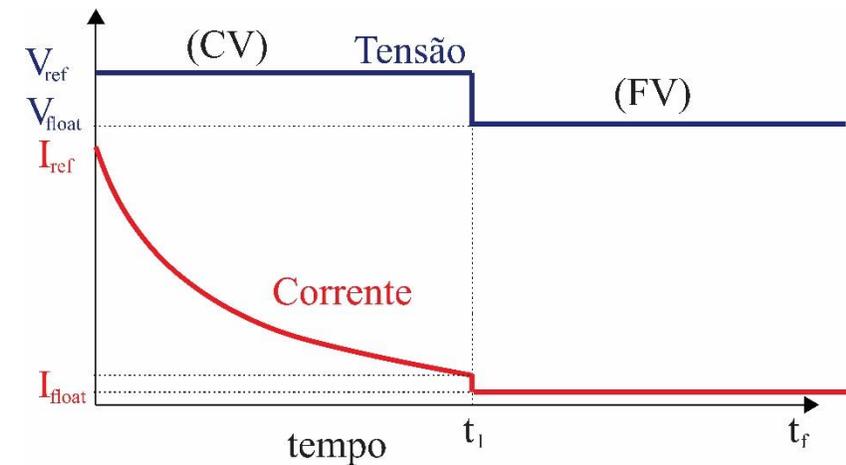
☐ Corrente constante e tensão constante;



☐ Carregamento por pulso;

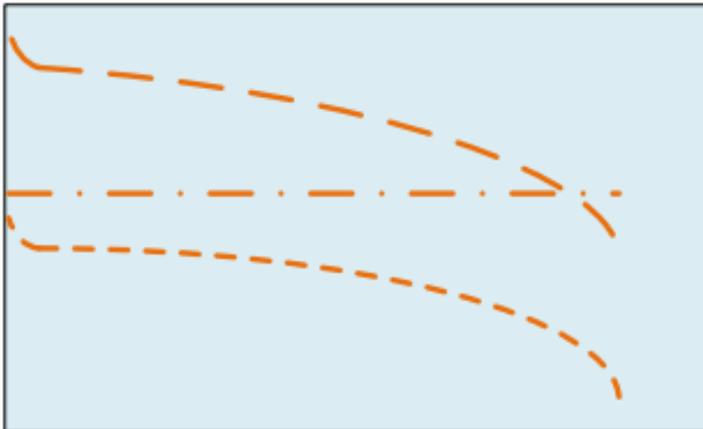


☐ Carregamento por flutuação

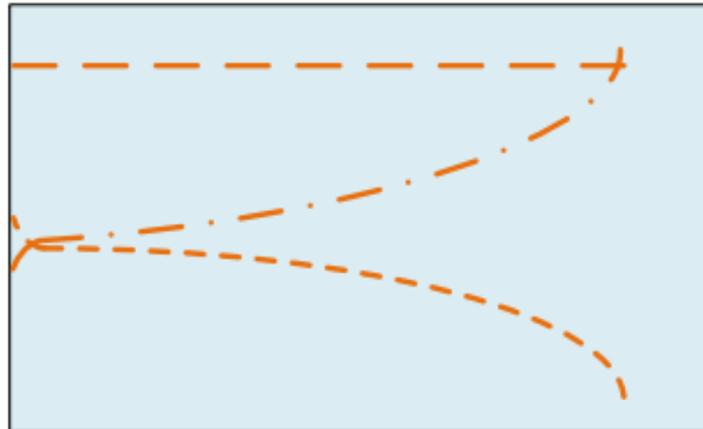


Procedimentos de descarga práticos

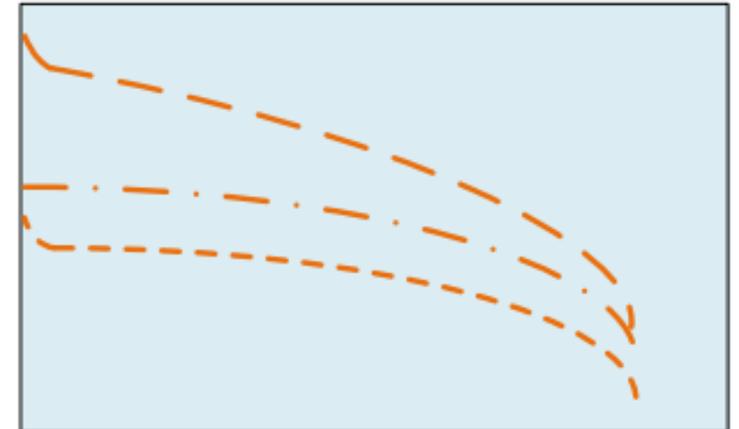
❑ Corrente constante



❑ Potência constante



❑ Resistência constante



--- Voltage

- . - Current

- - - Power

Fonte: D. I. Stroe. "Storage Systems based on Lithium-Ion Batteries for Grid Support and Automotive Applications." PhD Course. Aalborg University. 2018

Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: afcupertino@ieee.org



www.gesep.ufv.br



@GESEP



@gesep_vicosa



Gesep



Pesquise por:
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas
Fotovoltaicos

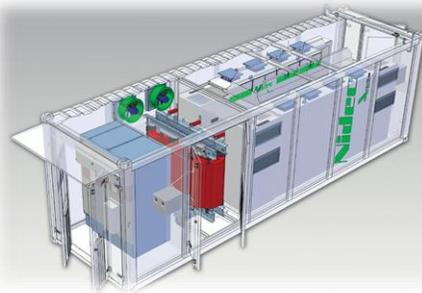


Pesquise por:
“EStimate”



Revisão sobre modelos de baterias

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Tipos de modelos

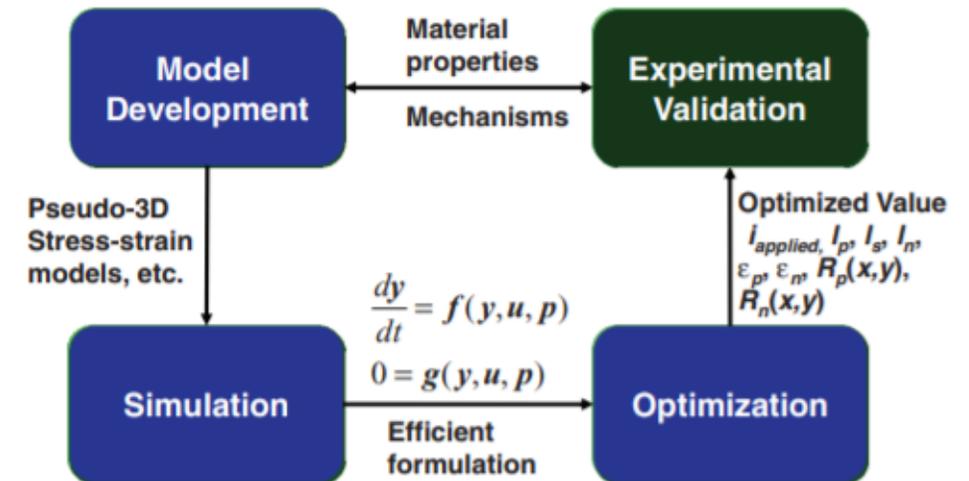
Modelos físico químicos;

Modelos matemáticos;

Modelos elétricos.

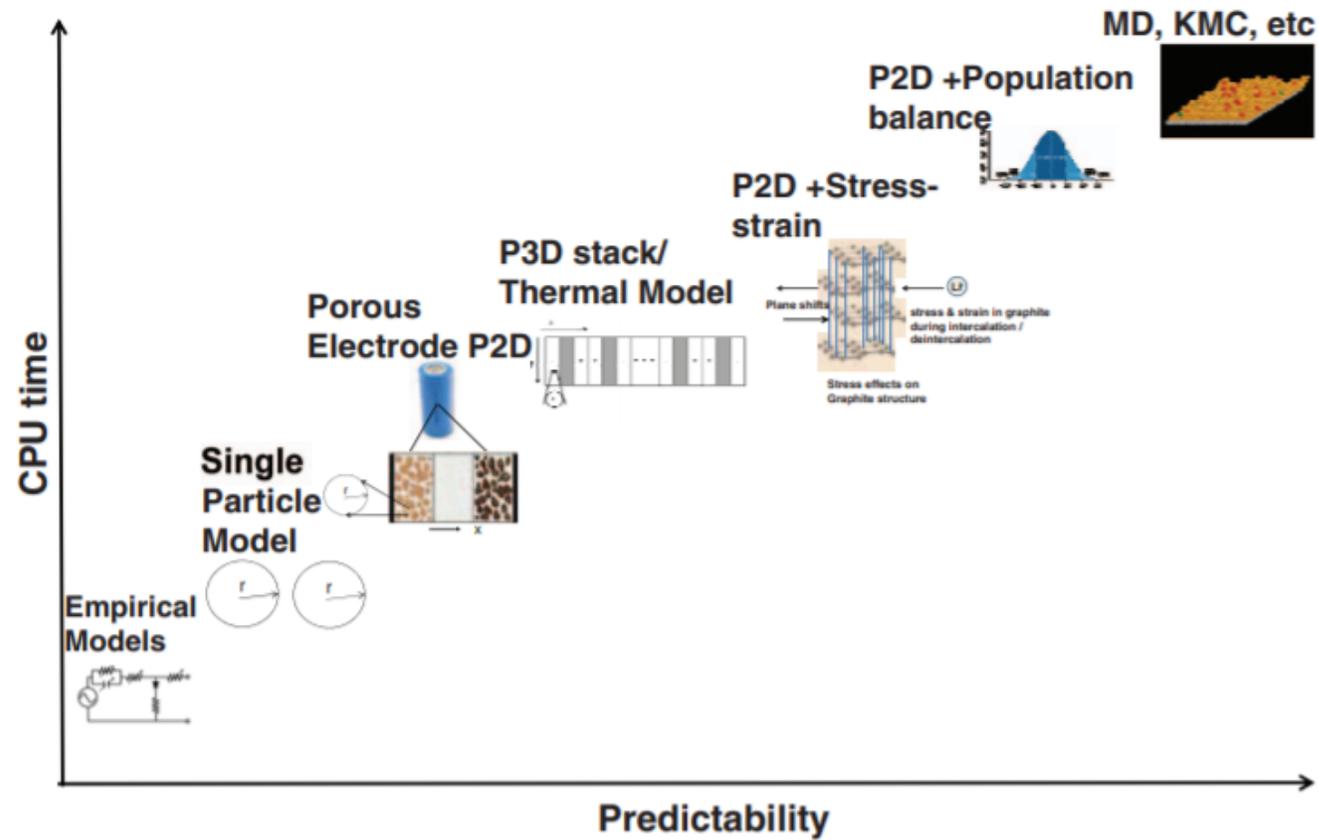
Modelos físico-químicos

- ❑ Identificação de processos que limitam a performance das baterias
- ❑ Pode prever quantidades macroscópicas (tensão, corrente) e microscópicas (concentração, temperatura interna, etc.);
- ❑ Interessante para quem projeta baterias;
- ❑ Requer informações relacionada a geometria da célula;
- ❑ Requer parâmetros empíricos;
- ❑ Alta complexidade mas boa precisão.



Fonte: V. Ramadesigan et al. "Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective." Journal of the Electrochemical Society. 2012

Exemplos de modelos físico-químicos

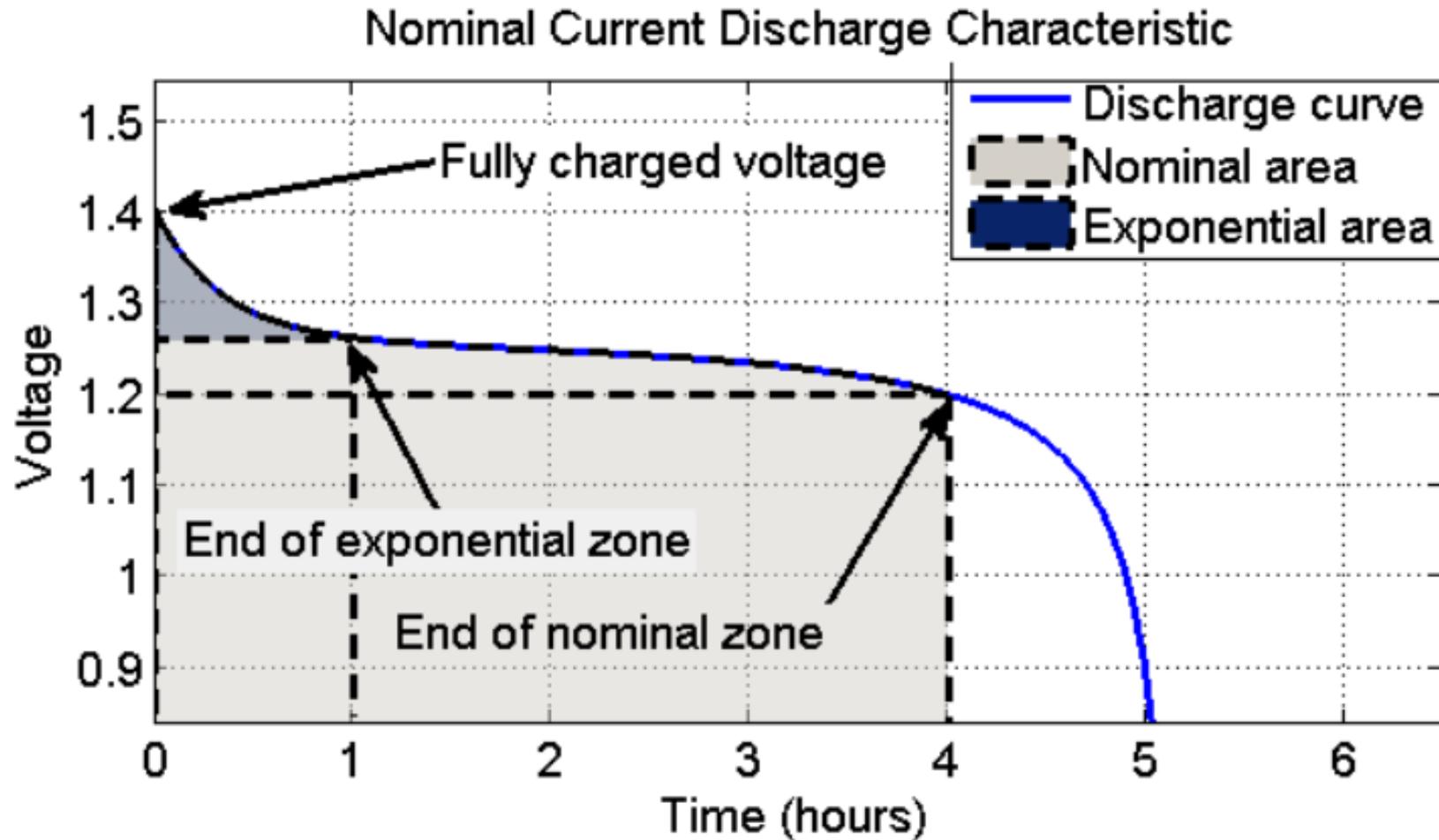


Fonte: V. Ramadesigan et al. "Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective." Journal of the Electrochemical Society. 2012

Modelos matemáticos

- ❑ Usado em aplicações onde um modelo muito preciso não é necessário;
- ❑ Foco nas grandezas macroscópicas;
- ❑ Baixo esforço computacional;
- ❑ Parâmetros abstratos → não existem na prática mas representam algum efeito;
- ❑ Modelos baseados na Equação de Shepherd (1965).

Modelos matemáticos



Fonte: O. Tremblay et al. "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles." IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007.

Equação de Shepherd

□ Equação durante a carga

$$V_{batt} = E_0 - K \left(\frac{1}{1 - DoD} \right) i - R i + A e^{-B DoD}$$

□ Equação durante a descarga

$$V_{batt} = E_0 + K \left(\frac{1}{1 - DoD} \right) i + R i + A e^{-B DoD}$$

□ V_{batt} é a tensão terminal da bateria;

□ i é a corrente nos terminais da bateria;

□ $DoD = \frac{\int i dt}{C}$ é a profundidade de descarga;

□ E_0 , K , R , A e B são os parâmetros de Shepherd → estimativa a partir do datasheet.

Equação de Shepherd

❑ Equação durante a carga

$$V_{batt} = E_0 - K \left(\frac{1}{1 - DoD} \right) i + Ae^{-BDoD} - R i$$

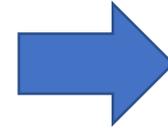
❑ Equação durante a descarga

$$V_{batt} = E_0 + K \left(\frac{1}{1 - DoD} \right) i + Ae^{-BDoD} + R i$$

- ❑ Termo não linear que representa a variação da tensão interna com a corrente;
- ❑ Bateria descarregada e corrente igual a zero, a tensão da bateria se aproxima de E_0 ;
- ❑ Circulação de corrente → variação instantânea da tensão;
- ❑ Problemas de simulação → loops algébricos.

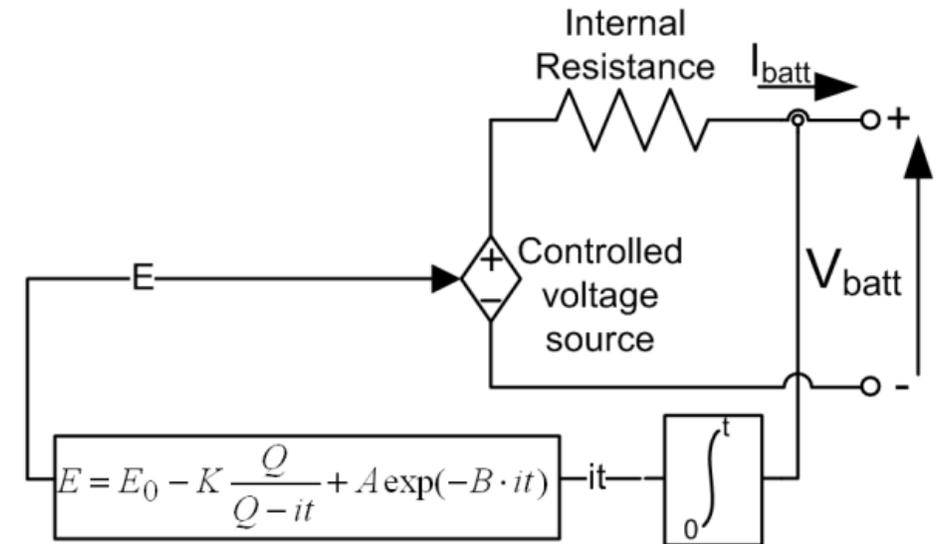
Equação de Shepherd modificada - 2007

$$V_{batt} = E_0 - K \left(\frac{1}{1-DoD} \right) i + A e^{-B DoD} - R i$$



$$V_{batt} = E_0 - K \left(\frac{Q}{Q - it} \right) + A e^{-B \cdot it} - R i$$

- ❑ Q é a capacidade da bateria;
- ❑ E é a tensão interna da bateria;
- ❑ $V_{batt} = E - R i$;
- ❑ $it = \int i dt$.



Fonte: O. Tremblay et al. "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles." IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007.

Equação de Shepherd modificada - 2007

- Modelo assume que o comportamento de carga e descarga são iguais;
- Resistência interna constante;
- Capacidade da bateria não varia com a corrente;
- Temperatura não é incluída;
- Alto descarga não é modelada.

A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles

Olivier Tremblay, *Member IEEE*, Louis-A. Dessaint, *Senior Member IEEE*, and Abdel-Allah Dekkiche
Electrical Engineering Department, Ecole de Technologie Supérieure

Fonte: O. Tremblay et al. "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles." IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007.

Equação de Shepherd modificada - 2009

Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications

Olivier Tremblay¹, Louis-A. Dessaint
Electrical Engineering Department, École de Technologie Supérieure
¹Email: olivier.tremblay.1@ens.etsmtl.ca

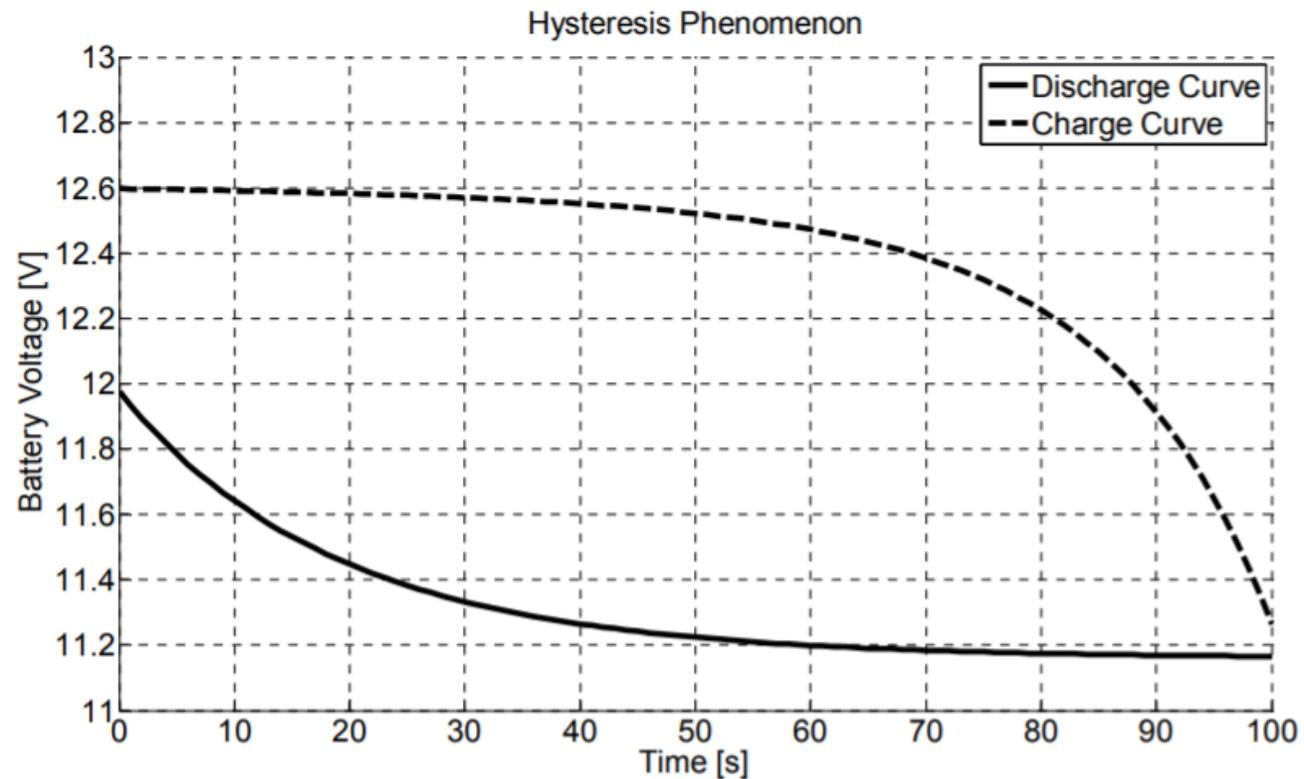
$$V_{batt} = E_0 - \underbrace{K \left(\frac{Q}{Q - it} \right) it}_{\text{Tensão de polarização}} - \underbrace{R_p(t) i^*}_{\text{Resistência de polarização}} + \exp(t)$$

- ❑ $i > 0 \rightarrow$ descarga;
- ❑ $i < 0 \rightarrow$ carga
- ❑ i^* é a corrente da bateria filtrada (primeira ordem, em torno de 30 segundos);
- ❑ Resolve o problema do loop algébrico;
- ❑ Coerente com experimentos \rightarrow tensão demora um tempo para responder aos distúrbios de corrente.

Fonte: O. Tremblay et al. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." World Electric Vehicle Journal. 2009.

Histerese da região exponencial

- ❑ Chumbo ácido, NiMH e NiCD: histerese da região exponencial!



Fonte: D. Gallo et al. "Optimization of Experimental Model Parameter Identification for Energy Storage Systems" Energies. 2013.

Equação de Shepherd modificada – Região exponencial

☐ Lítio íon

$$\exp(t) = Ae^{-B \cdot it}$$

☐ Chumbo ácido, NiMH e NiCD: inclusão da histerese

$$\frac{d}{dt} \exp(t) = B|i(t)|(-\exp(t) + A u(t))$$

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{durante a carga} \\ 0 & \text{durante descarga} \end{cases}$$

Fonte: O. Tremblay et al. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." World Electric Vehicle Journal. 2009.

Resistência de polarização – diferentes químicas

☐ Lítio íon e Chumbo ácido

➤ Descarga

$$R_p(t) = \frac{Q}{Q - it}$$

➤ Carga

$$R_p(t) = \frac{Q}{it + 0.1 Q}$$

☐ NiMH e NiCD

➤ Descarga

$$R_p(t) = \frac{Q}{Q - it}$$

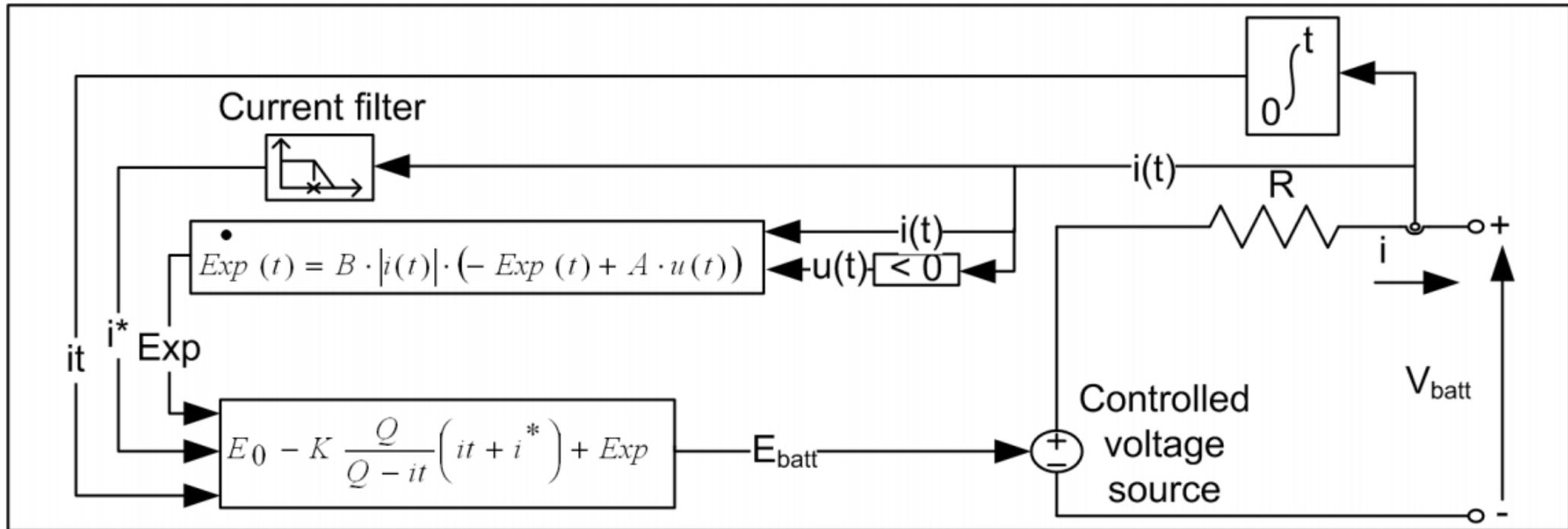
➤ Carga

$$R_p(t) = \frac{Q}{|it| + 0.1 Q}$$

☐ Modelo ainda pode considerar a variação de temperatura nos parâmetros.

Fonte: O. Tremblay et al. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." World Electric Vehicle Journal. 2009.

Equação de Shepherd modificada 2009 - Descarga



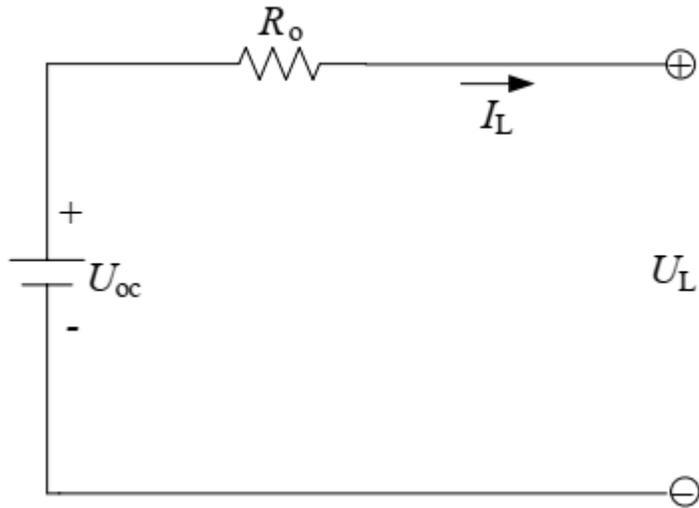
Fonte: O. Tremblay et al. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." World Electric Vehicle Journal. 2009.

Modelos elétricos

- ❑ Modelos matemáticos → 5 a 20 % de precisão para baterias de Lítio íon;
- ❑ Modelos elétricos: Baseados em circuitos equivalentes;
- ❑ Foco nas grandezas macroscópicas;
- ❑ Temperatura pode ser incluída;
- ❑ Precisão de 3 a 7 %;
- ❑ Relação de compromisso entre complexidade e precisão.

Fonte: O. Tremblay et al. "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles." IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007.

Modelo de resistência interna

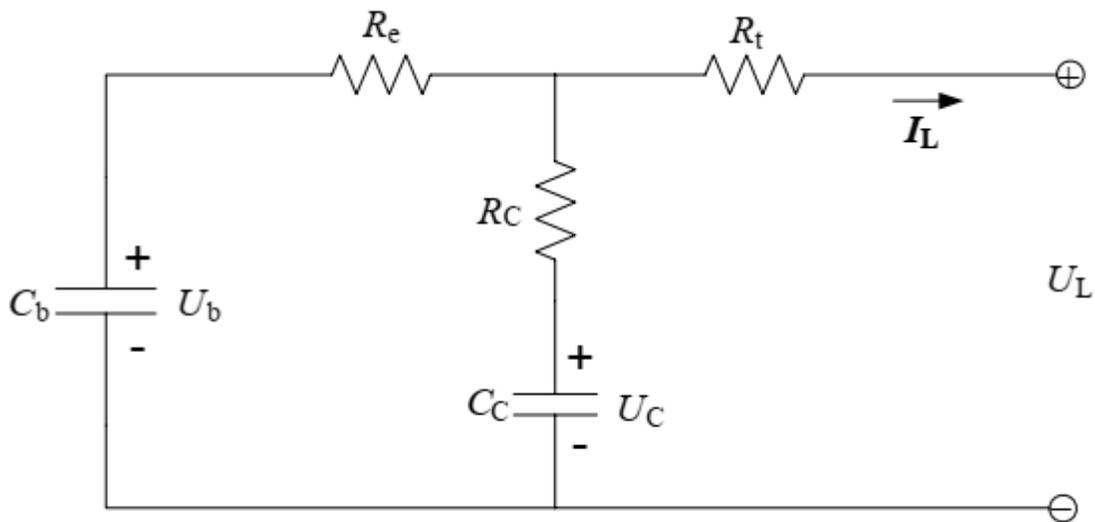


$$U_L = U_{oc} - I_L R_o$$

- ❑ U_{oc} é uma fonte de tensão ideal → tensão de circuito aberto;
- ❑ R_o pode ser uma função da SOC, estado de vida e temperatura;
- ❑ Neste caso utilizam-se look-up tables.

Fonte: H. He et.al. “Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach”. Energies 2011

Modelo RC



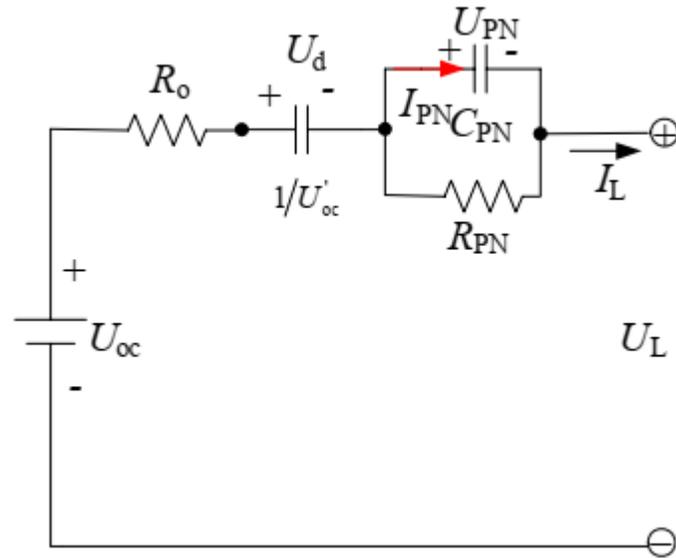
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L]$$

$$[U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_t & -\frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L]$$

- ❑ Desenvolvido pela empresa SAFT;
- ❑ C_c representa a capacitância de superfície e C_b representa a capacidade de armazenamento;
- ❑ Resistores modelam as perdas da bateria.

Fonte: H. He et.al. "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach". Energies 2011

Modelo PNGV

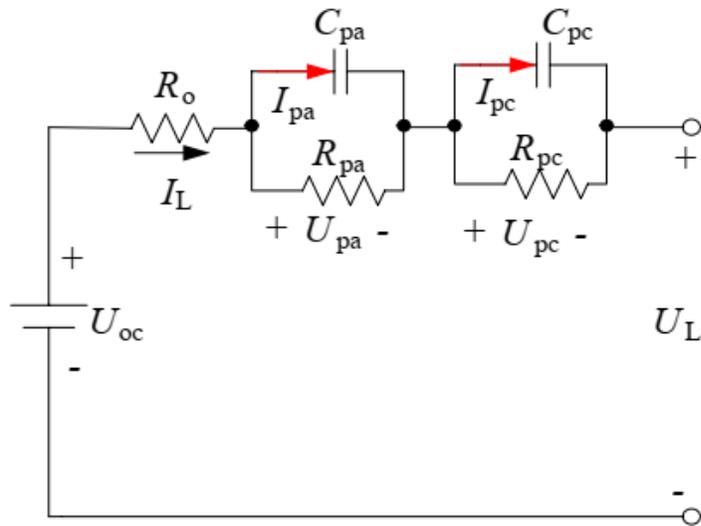


$$\begin{cases} \dot{U}_d = U'_{oc} I_L \\ \dot{U}_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \\ U_L = U_{oc} - U_d - U_{PN} - I_L R_o \end{cases}$$

- ❑ Capacitor adicional com valor $\frac{1}{U'_{oc}}$;
- ❑ Capacitor é usado para descrever a tensão de circuito aberto como um acúmulo da corrente de carga.

Fonte: H. He et.al. "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach". Energies 2011

Modelo de dupla polarização

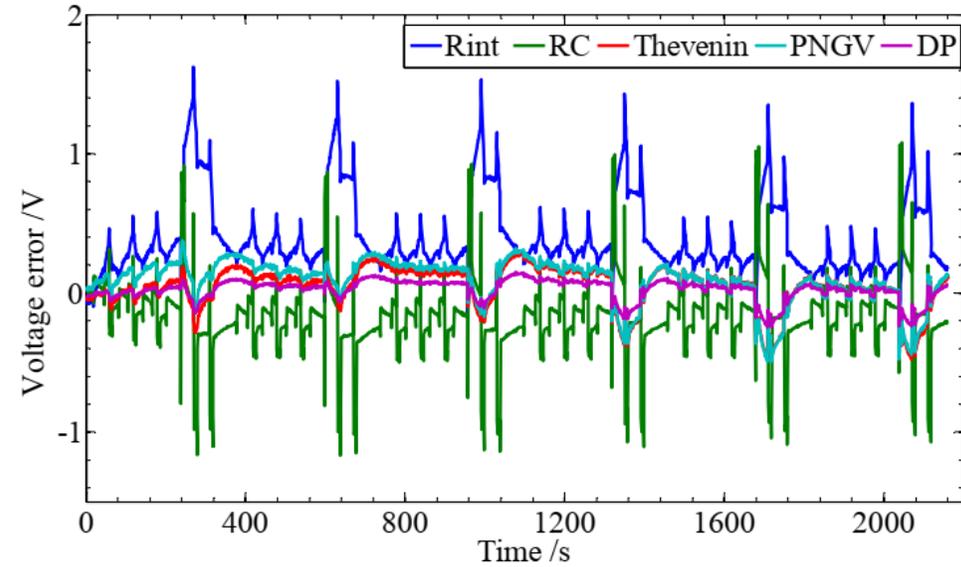
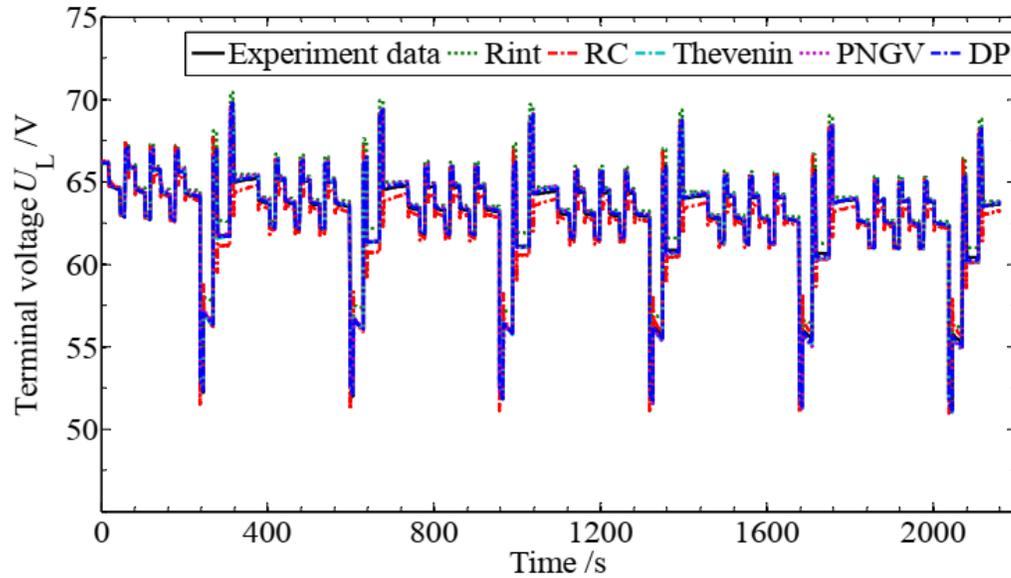


$$\begin{cases} \dot{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa} C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \dot{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc} C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_o \end{cases}$$

- ❑ Acrescenta dois conjuntos RC paralelo ao modelo de resistência interna;
- ❑ Separa dois mecanismos de polarização: o mecanismo de concentração e o mecanismo eletroquímico.

Fonte: H. He et.al. "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach". Energies 2011

Comparação



Model	Maximum (V)	Mean (V)	Variance (V ²)	Max. Error Rate (%)
Rint model	1.6229	0.3945	0.0762	2.8176
RC model	1.0785	0.2336	0.0463	2.0337
Thevenin model	0.2967	0.0455	0.0220	0.5151
PNGV model	0.5772	0.0875	0.0243	1.0020
DP model	0.2183	0.0429	0.0021	0.3790

Fonte: H. He et.al. “Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach”. Energies 2011

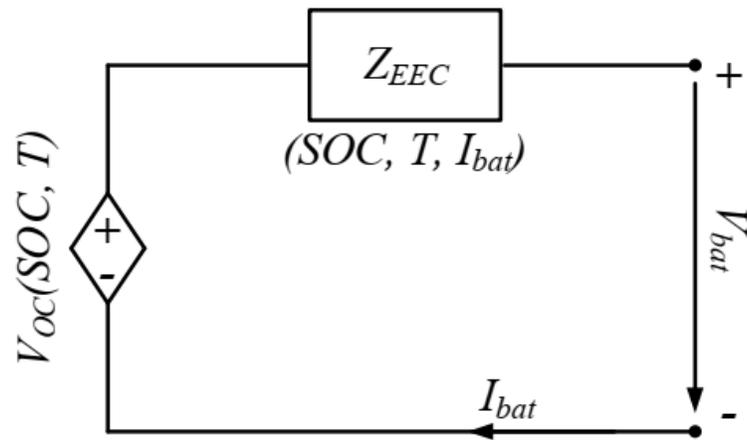
Comparação – tipos de modelos

Modelling Approach / Criteria	Electrochemical	Mathematical	Electric
<i>Accuracy</i>	High	Reduced	Relatively High
<i>Computation complexity</i>	Very High	Reduced	Medium
<i>Parametrization</i>	Based on extensive laboratory measurements. <i>a priori</i> knowledge is required	Based on battery data-sheet	Based on laboratory measurements
<i>Physic-chemical meaning</i>	Very good	Poor	Relatively good

Fonte: D. I. Stroe. “Lifetime Models for Lithium Ion Batteries used in Virtual Power Plants”. PhD Thesis. Aalborg University. 2014

Modelo de impedância de baterias

- ❑ Ensaio de espectroscopia eletroquímica;
- ❑ Permite determinar a resposta em frequência da bateria;
- ❑ Permite observar mecanismos de transporte de massa, dupla polarização e mudanças na cinética da bateria.

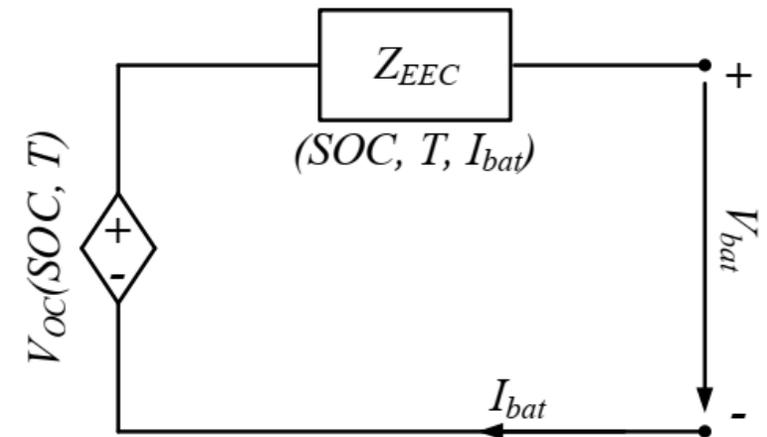


$$V_{bat} = V_{OC} \pm V_{EEC}$$

Fonte: D. I. Stroe. "Lifetime Models for Lithium Ion Batteries used in Virtual Power Plants". PhD Thesis. Aalborg University. 2014

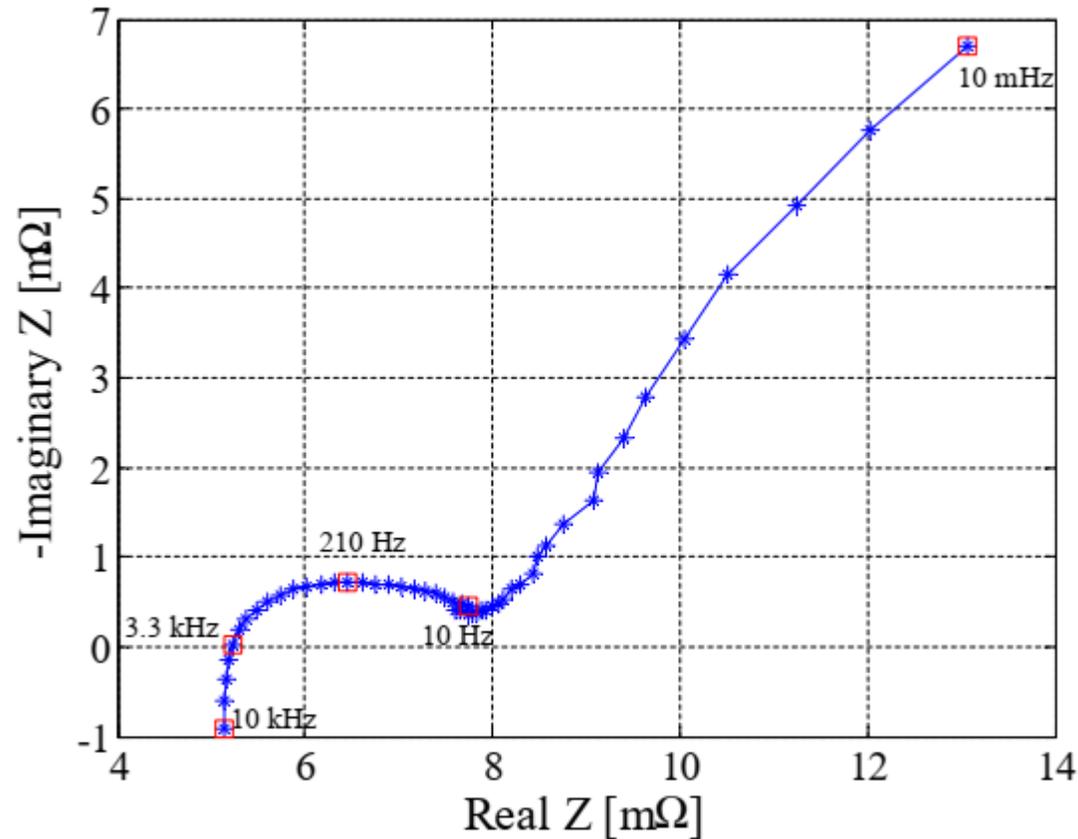
Modelo de impedância de baterias

- ❑ Método galvanoplástico → pequena corrente AC é aplicada na bateria e seu comportamento é observado;
- ❑ Método potencio estático → pequena tensão AC é aplicada;
- ❑ Mede-se a resposta em frequência da bateria de mHz até kHz;
- ❑ Resultado apresentado em um diagrama de Nyquist;
- ❑ Metodologia aplicada em diversas tecnologias de armazenamento.

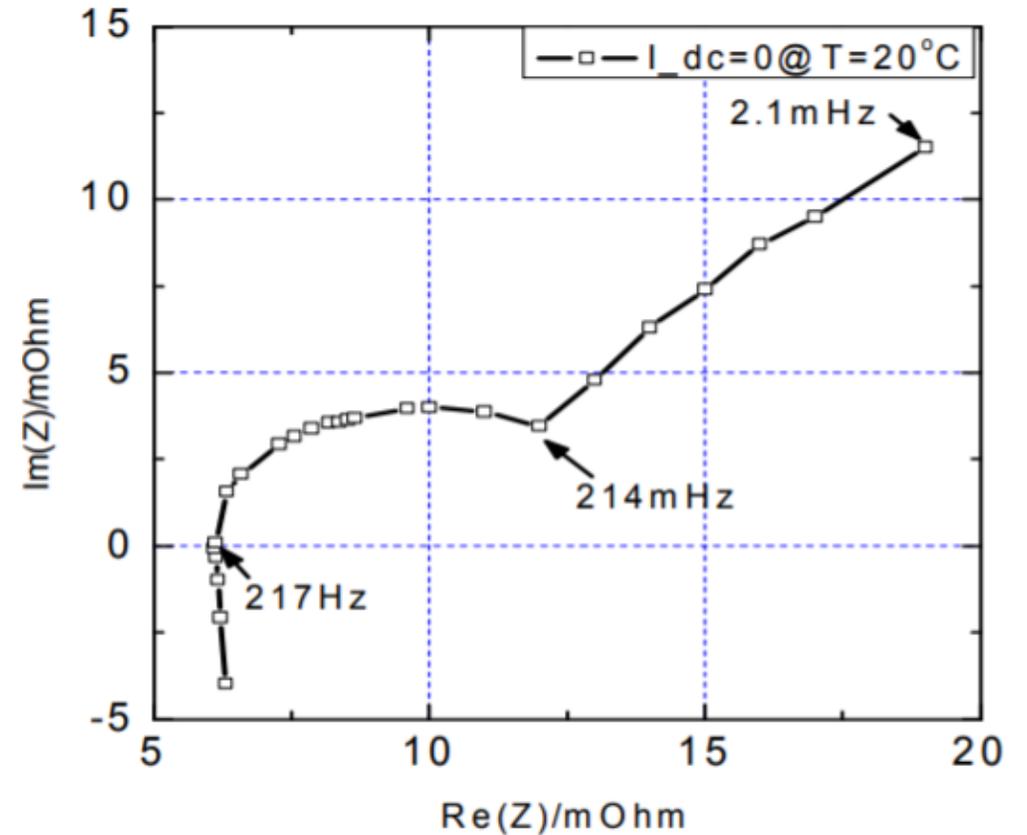


Fonte: D. I. Stroe. "Lifetime Models for Lithium Ion Batteries used in Virtual Power Plants". PhD Thesis. Aalborg University. 2014

Exemplo de curvas de impedância

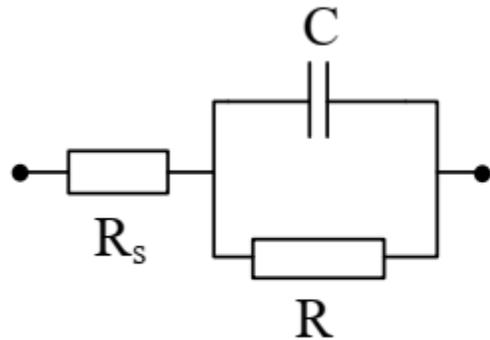
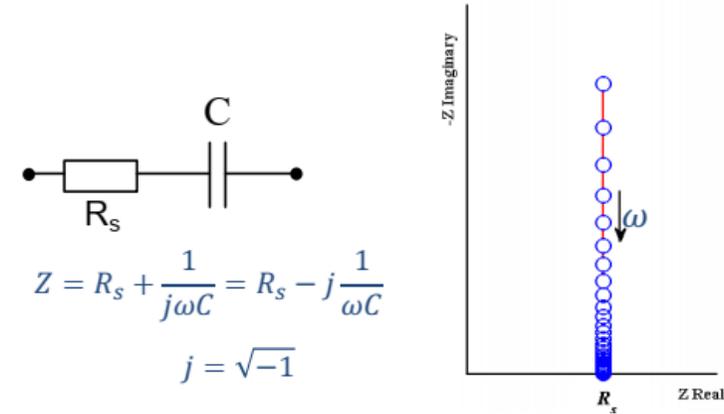
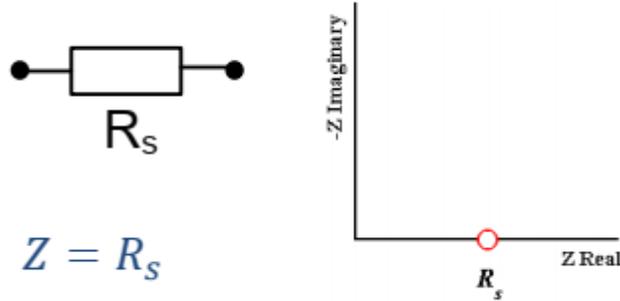


Fonte: D. I. Stroe. "Lifetime Models for Lithium Ion Batteries used in Virtual Power Plants". PhD Thesis. Aalborg University. 2014



Fonte: F. Xuyun and S. Zechang. "A battery model including hysteresis for State-of-Charge estimation in Ni-MH". IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008.

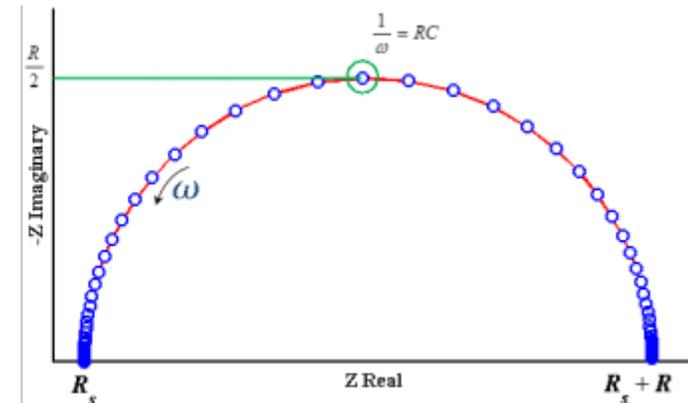
Revisão – diagramas de Nyquist



$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}$$

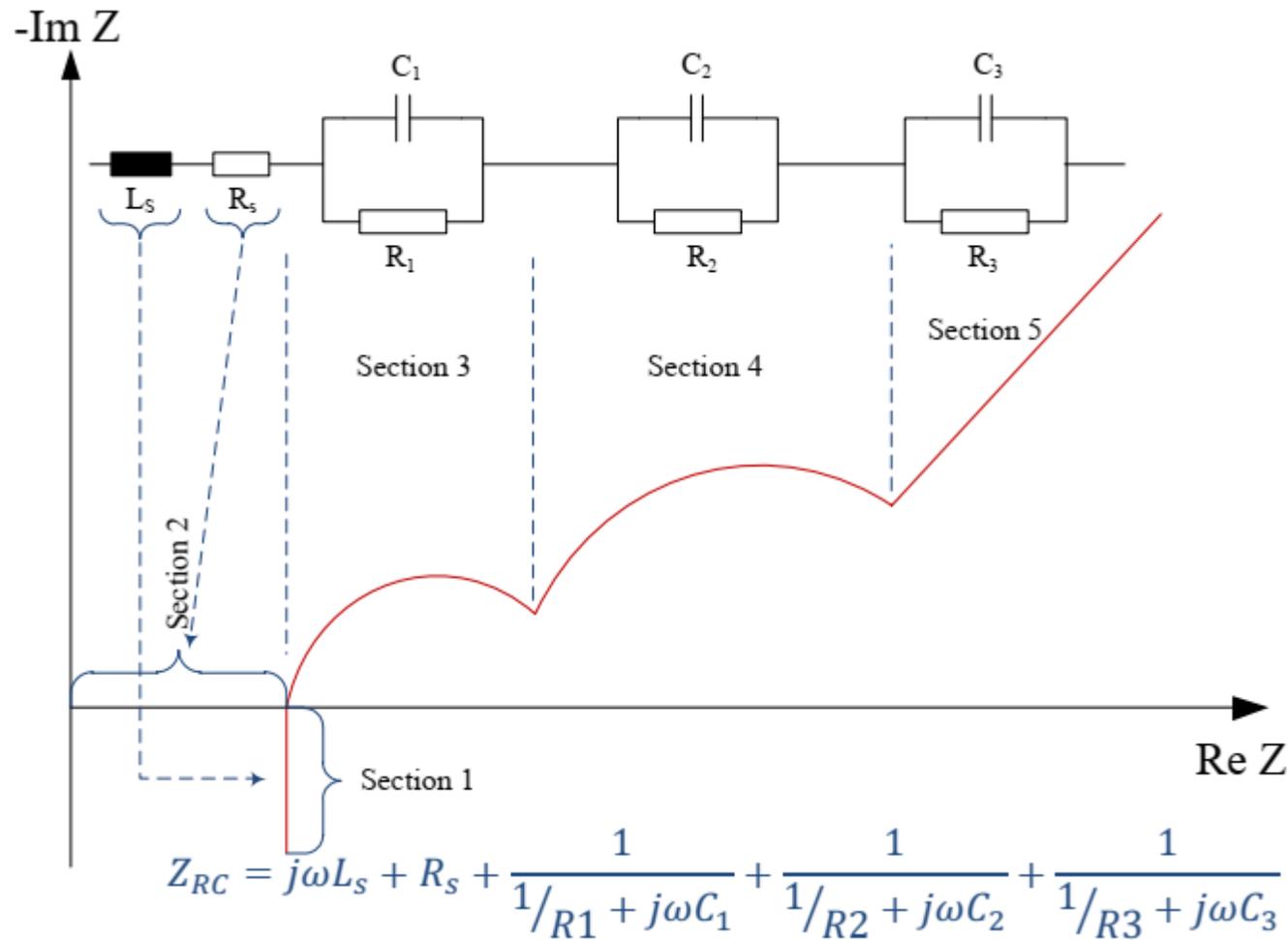
$$= R_s + \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$Z = R_s + \frac{R}{1 + (\omega RC)^2} - j \frac{\omega R^2 C}{1 + (\omega RC)^2}$$



Fonte: D. I. Stroe. “Storage Systems based on Lithium-Ion Batteries for Grid Support and Automotive Applications.” PhD Course. Aalborg University. 2018

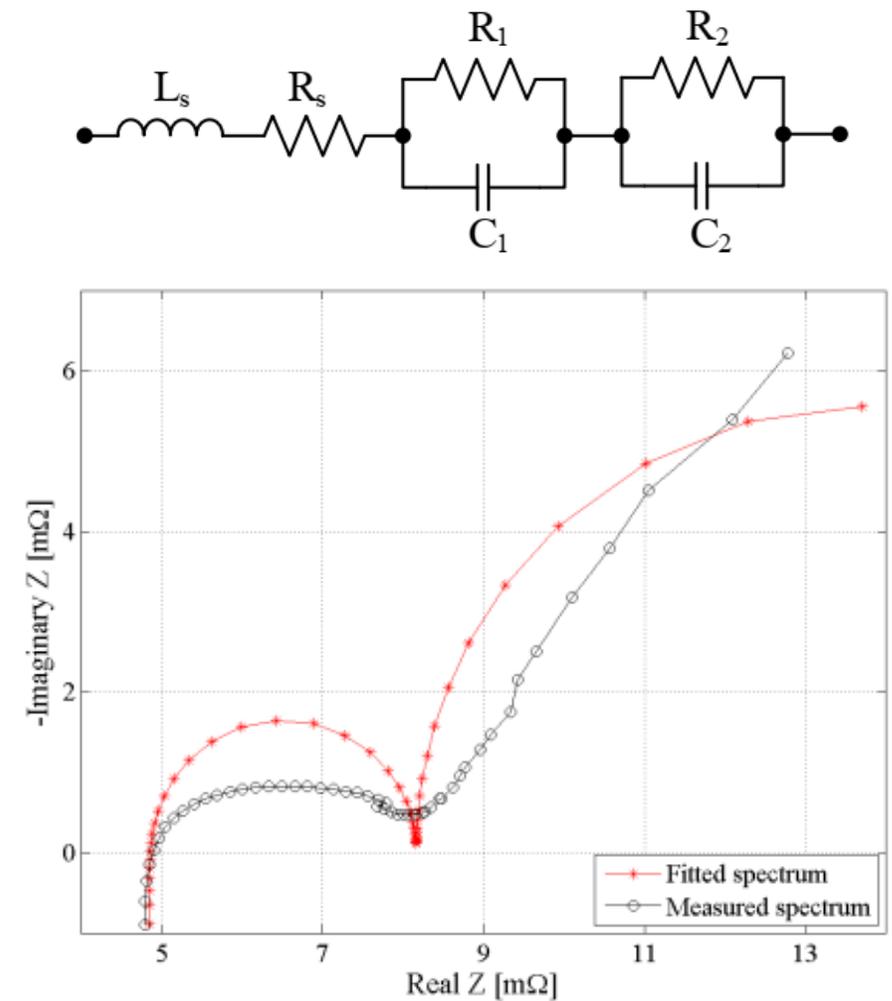
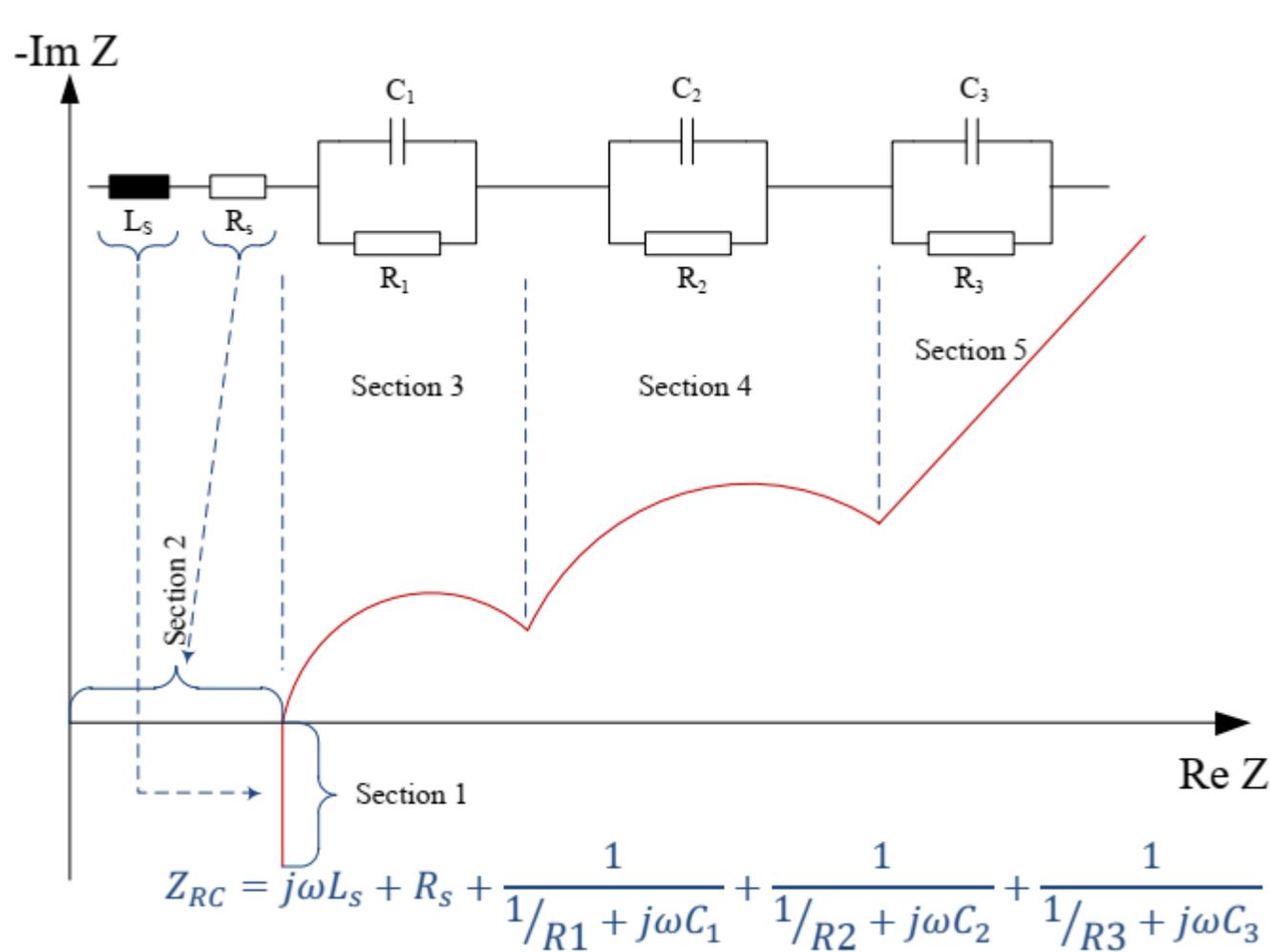
Exemplo de curvas de impedância – bateria de lítio íon



- 1) Comportamento indutivo dos terminais
- 2) Resistência elétrica → coletores de corrente, material ativo, eletrólito e separadores.
- 3) Associada a interface sólida do eletrólito formada na superfície do ânodo durante ciclagem
- 4) Resistência de transferência de cargas e polarização dupla;
- 5) Processo de difusão do material dos eletrodos em baixas frequências.

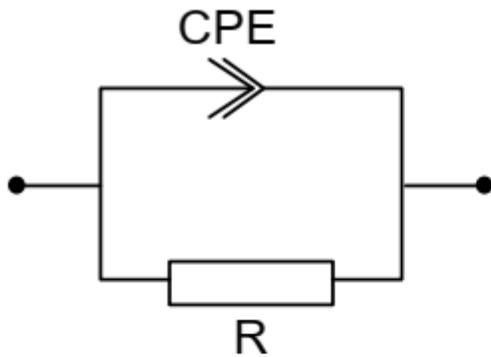
Fonte: D. I. Stroe. "Storage Systems based on Lithium-Ion Batteries for Grid Support and Automotive Applications." PhD Course. Aalborg University. 2018

Exemplo de curvas de impedância – bateria de lítio íon



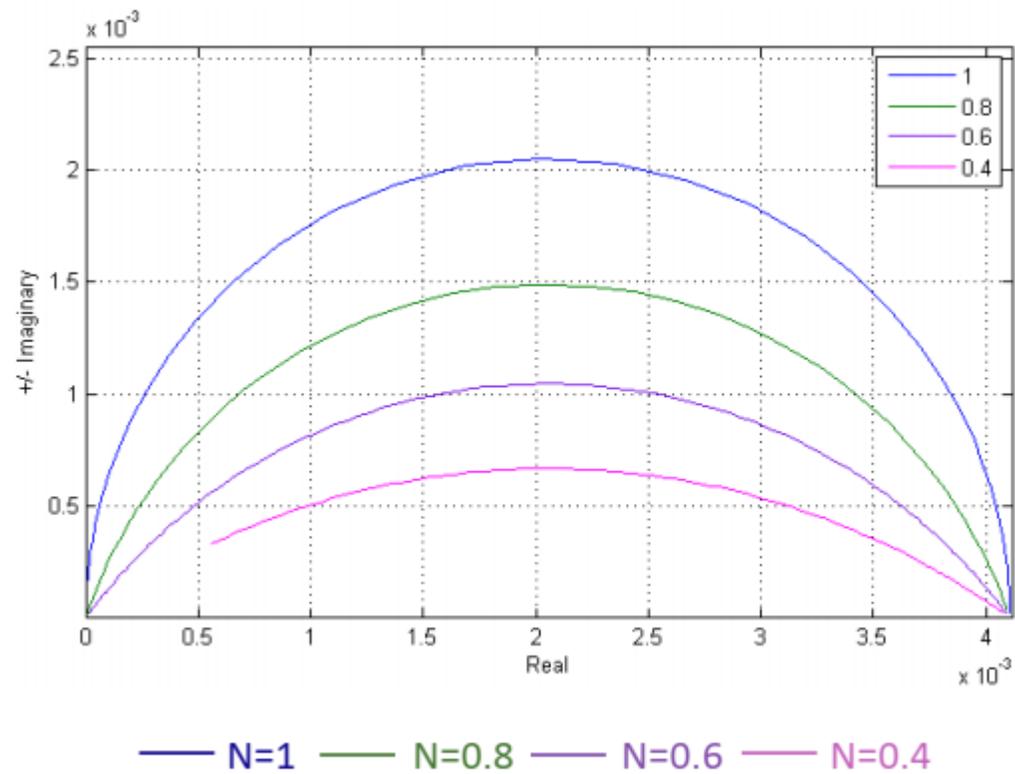
Fonte: D. I. Stroe. “Storage Systems based on Lithium-Ion Batteries for Grid Support and Automotive Applications.” PhD Course. Aalborg University. 2018

Elemento ZARC



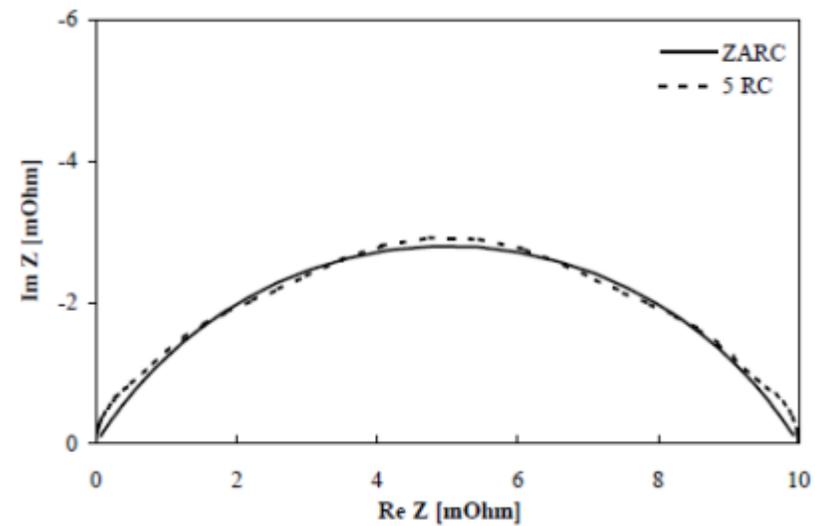
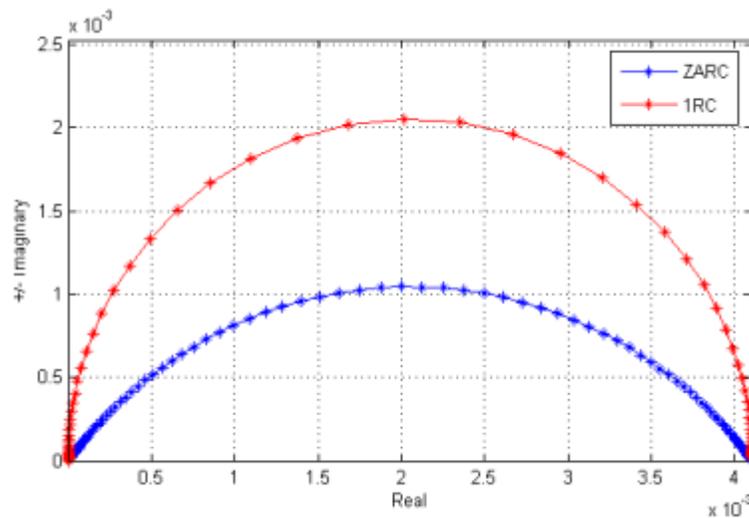
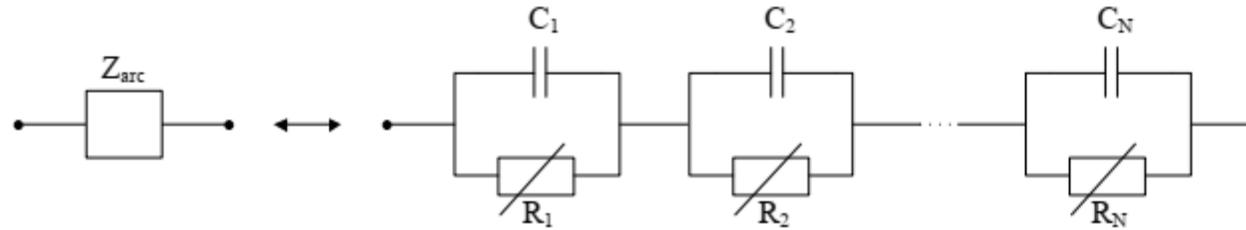
$$Z_{CPE} = \frac{1}{(j\omega)^N Q}$$

$$Z_{ZARC} = \frac{1}{1/R + (j\omega)^N Q}$$



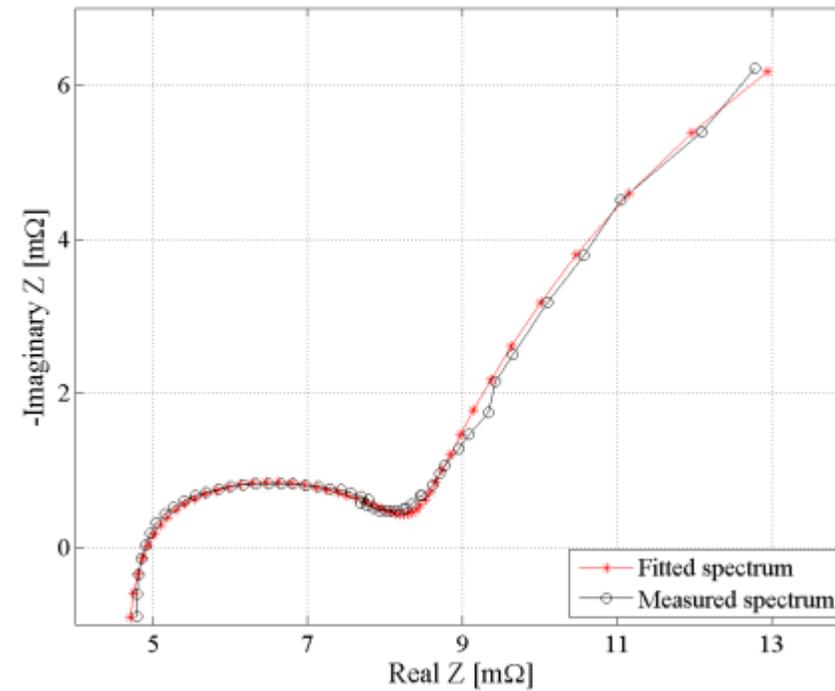
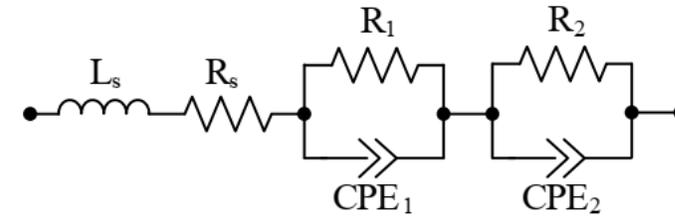
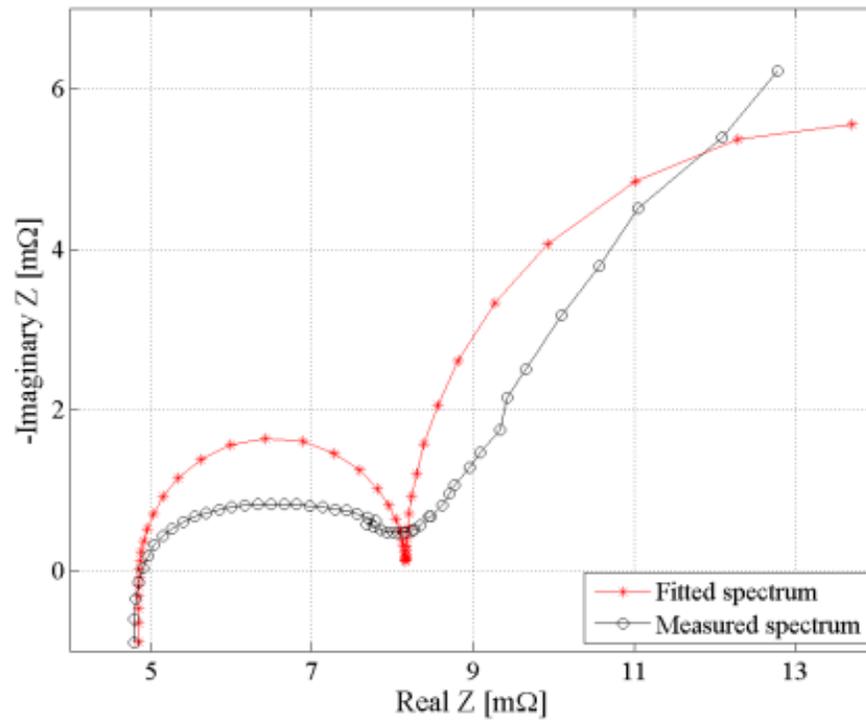
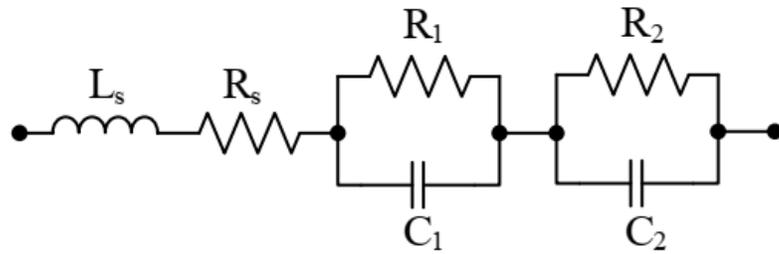
Fonte: D. I. Stroe. "Storage Systems based on Lithium-Ion Batteries for Grid Support and Automotive Applications." PhD Course. Aalborg University. 2018

Elemento ZARC

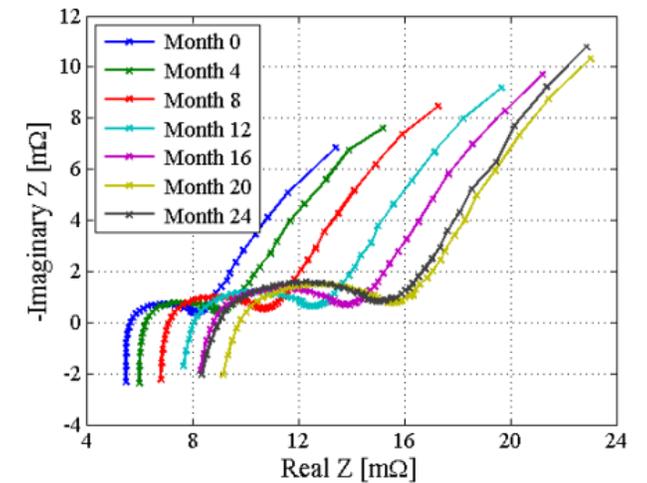
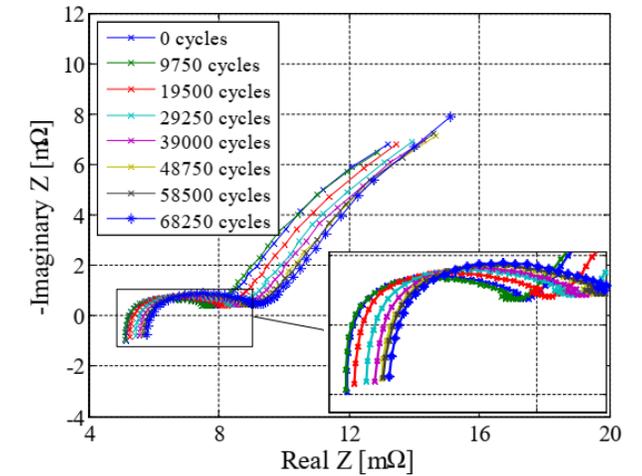
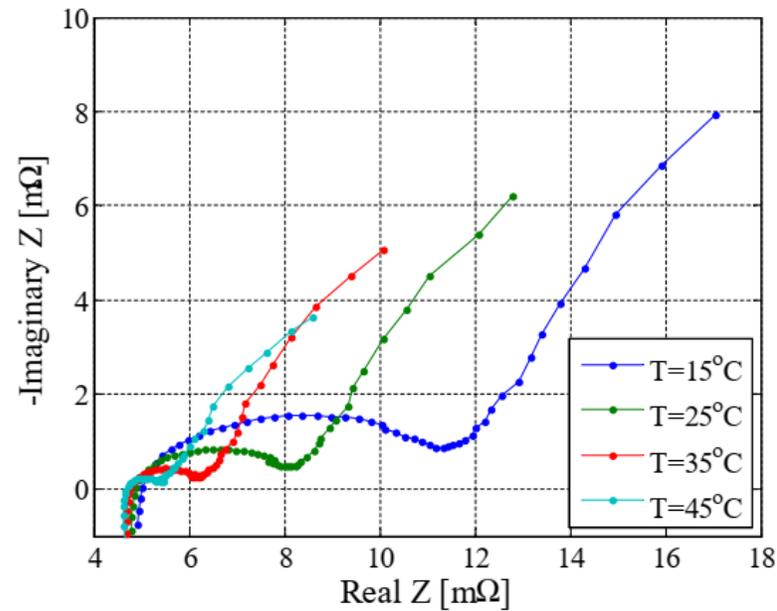
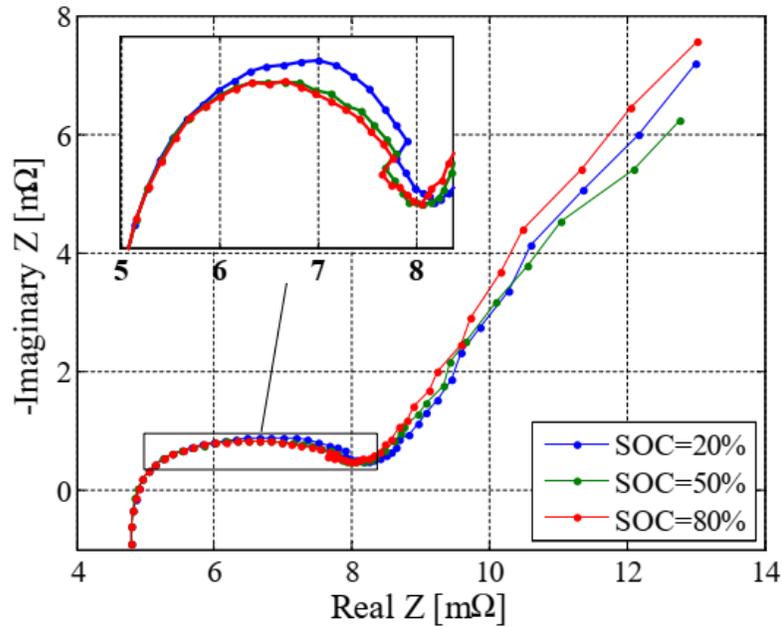


Fonte: S. Buller. “Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage in Advanced Automotive Power Systems”, PhD Thesis, RWTH Aachen, 2003.

Efeito do elemento ZARC



Parâmetros que afetam as curvas de impedância



Fonte: D. I. Stroe. "Lifetime Models for Lithium Ion Batteries used in Virtual Power Plants". PhD Thesis. Aalborg University. 2014

Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: afcupertino@ieee.org



www.gesep.ufv.br



@GESEP



@gesep_vicosa



Gesep



Pesquise por:
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas
Fotovoltaicos

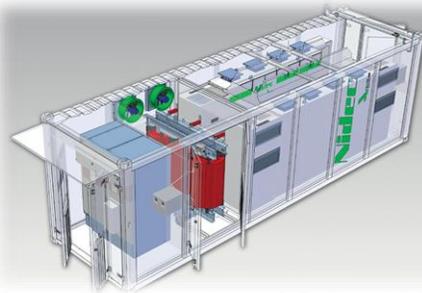


Pesquise por:
“EStimate”



Exemplo - Simulação de modelos de baterias no PLECS

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Objetivo da simulação

Modelo de resistência interna;

A resistência $R_o = 1 \text{ m}\Omega$;

Curva de circuito aberto;

Realizar uma simulação de uma célula;

Realizar a simulação do rack montado com estas células (286 em série, 5 strings em paralelo).

