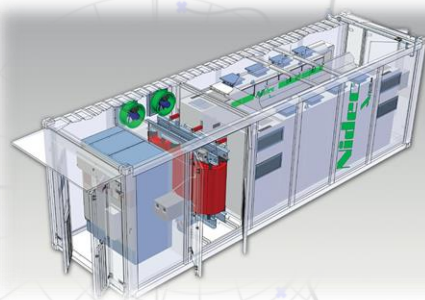




Estimação de estados (status) de baterias

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Tópicos a serem abordados

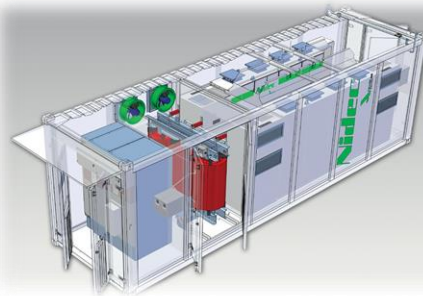
- ❑ Variáveis de estado (status) da bateria;
- ❑ Metodologias de estimação de estados;
- ❑ Discussão.



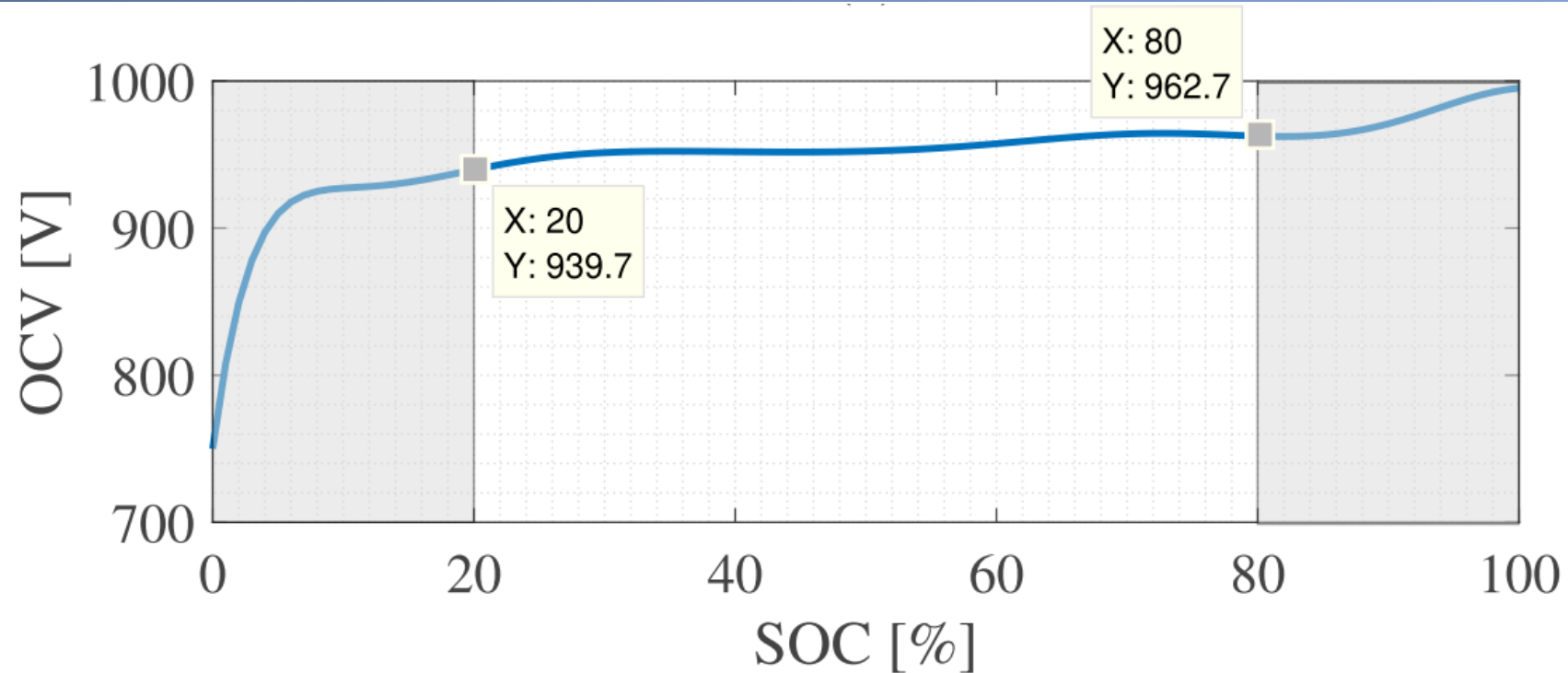


Variáveis de estado (status) da bateria

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Por que o estado de carga não é o bastante?



- ❑ Estado de carga → carga armazenada na bateria → integral da corrente;
- ❑ Não se tem o valor de energia ou da potência que pode ser fornecida!
- ❑ Conclusão: outras métricas são necessárias!



Estados de uma bateria

- ✓ SOC – State of Charge;
- ✓ SOH – State of health;

- ✓ SOP – State of power;
- ✓ SOF – State of function;
- ✓ SOE – State of energy.

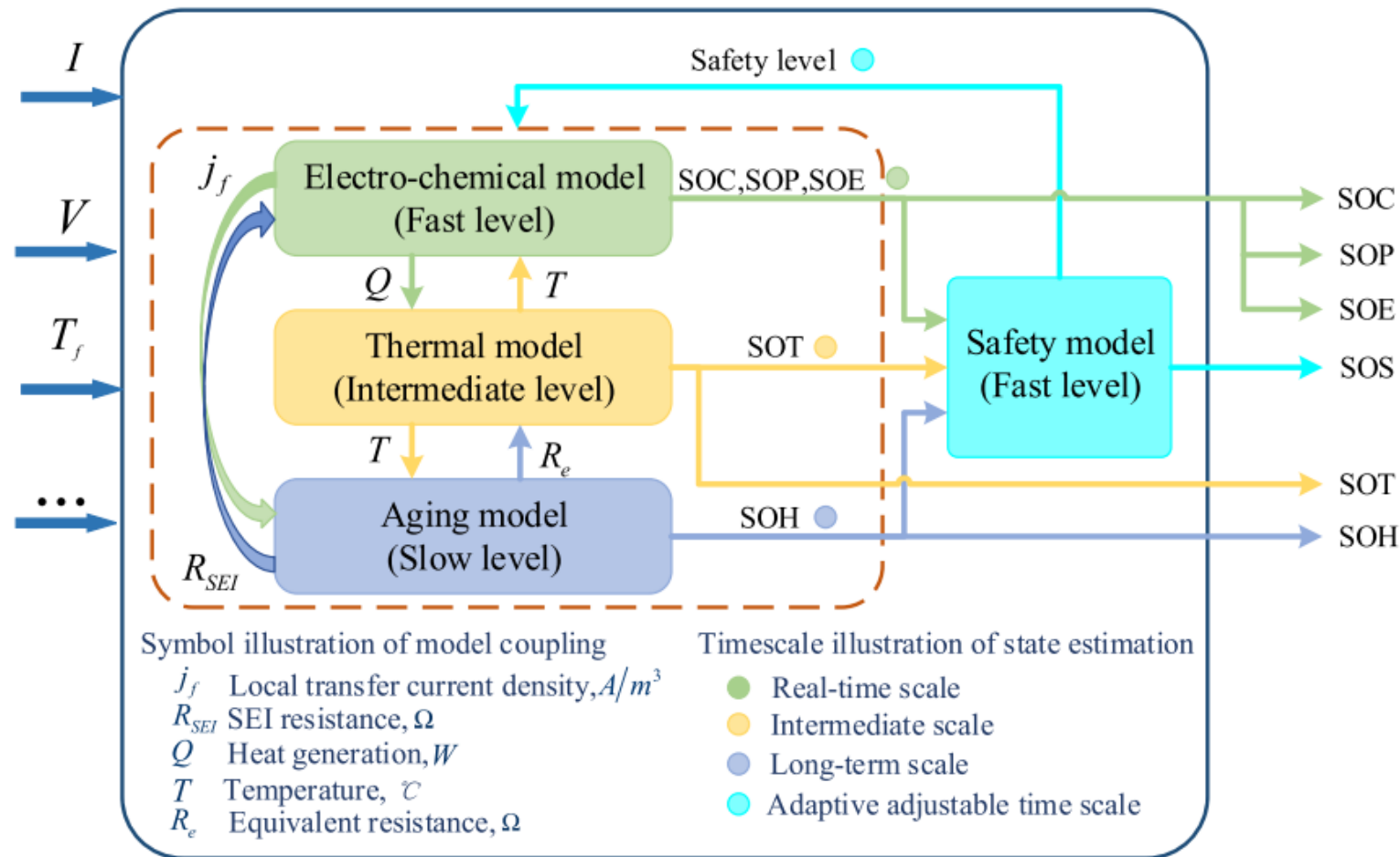
- ✓ SOT – State of temperature;
- ✓ SOS – State of safety.

❑ Sistemas práticos: medição de tensão, corrente e a temperatura;

❑ Conclusão: Estados devem ser estimados!



Estimação dos diferentes estados de uma bateria



Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Definições formais – Estados de uma bateria

□ Estado de carga (SOC):

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{I(t) \cdot \eta}{Q_n} dt$$

Onde η é a eficiência coulômbica ou eficiência farádica.

□ Estado de potência (SOP):

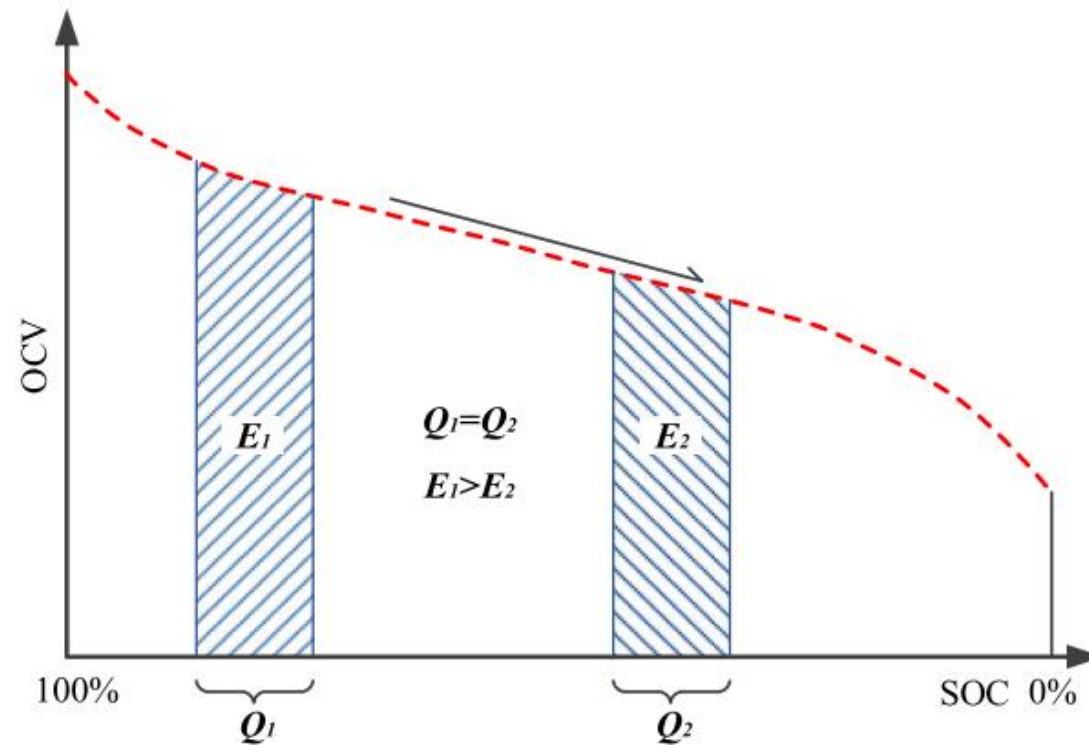
$$P_{\max}^k(t) = I_{\max}^k(t) V_{\text{limit}}^k(t), \quad k \in \{\text{discharge, charge}\}$$

- Limitado pelas condições (temperatura, estado de carga, tempo, etc);
- Conceito análogo ao SOF;

Definições formais – Estados de uma bateria

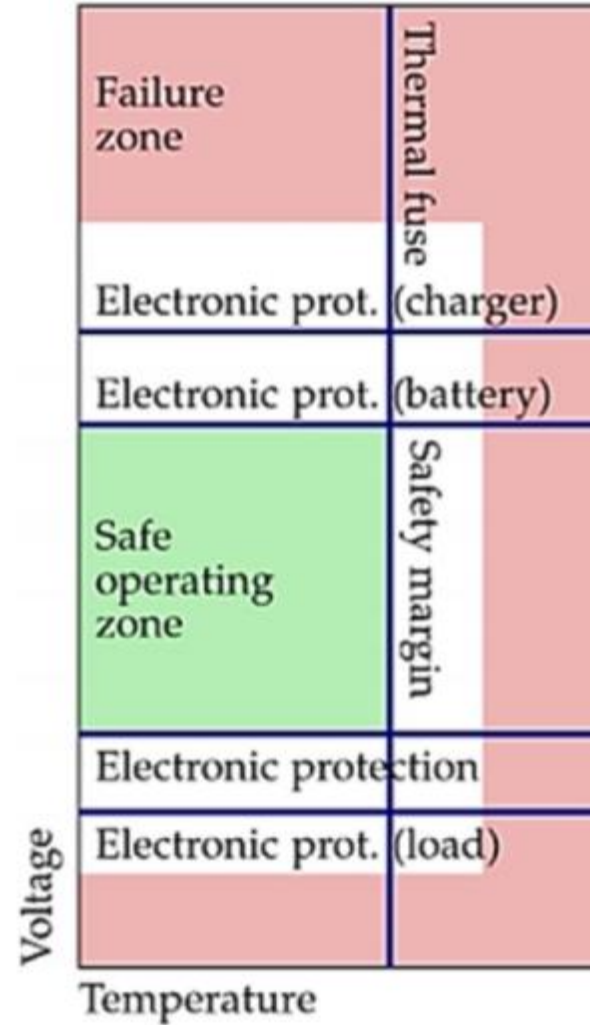
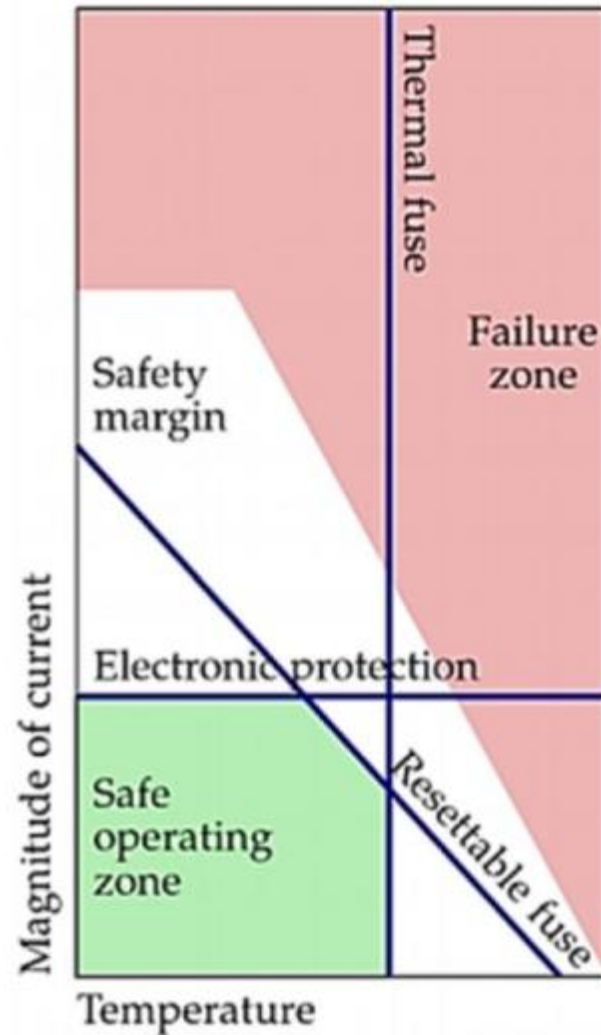
□ Estado de energia (SOE):

$$SOE(t) = SOE(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t P(\tau) d\tau}{E_N}$$



Fonte: X. Hu et. al. “State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends.” Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Exemplo de SOA



Fonte: S. Park et. al.. "Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems".
Journal of Power Electronics. 2020.

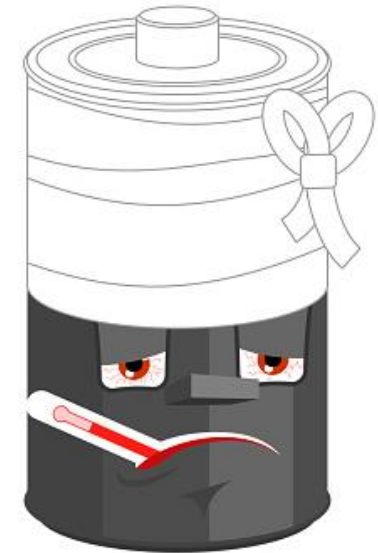
Definições formais – Estados de uma bateria

□ Estado de energia saúde (SOH):

$$SOH_{cap} = \frac{C}{C_o} \times 100$$

$$SOH_{Res} = \frac{R_o}{R} \times 100$$

- Pode-se definir a RUL → remaining useful life;
- Indicador de substituição das baterias.

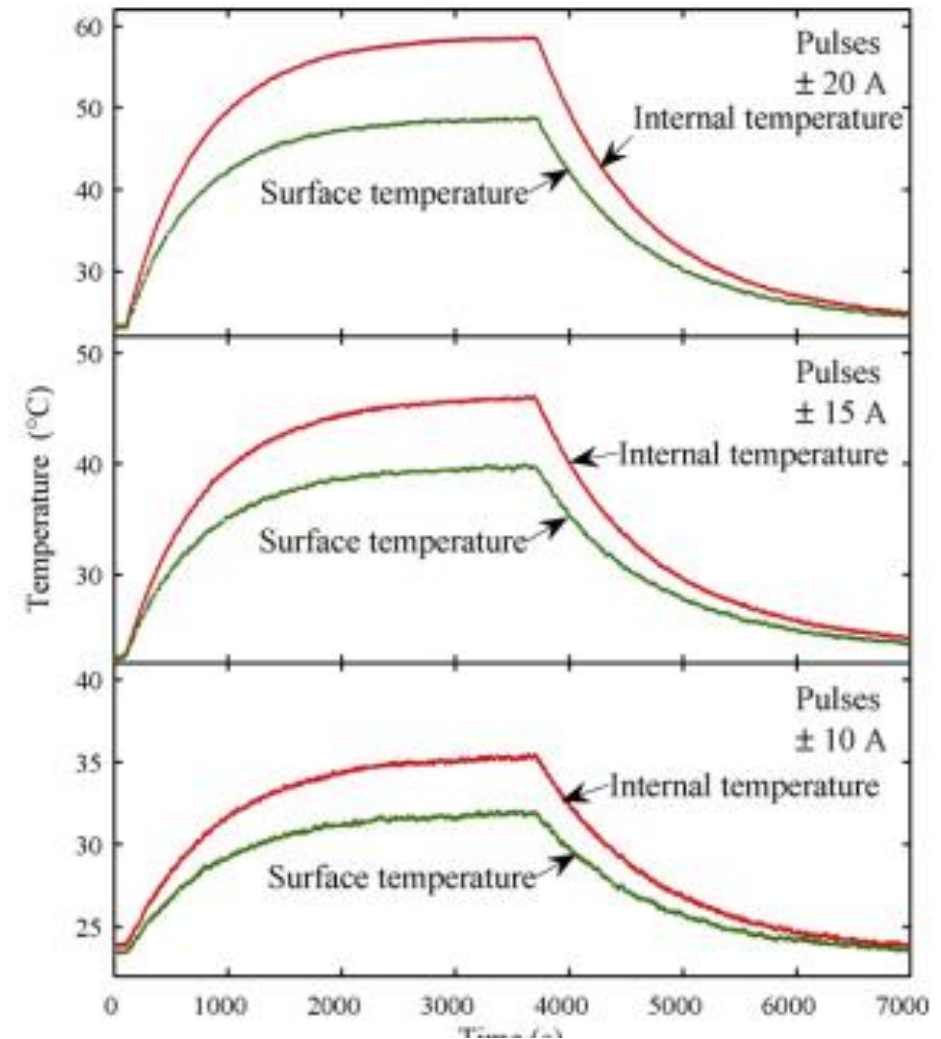
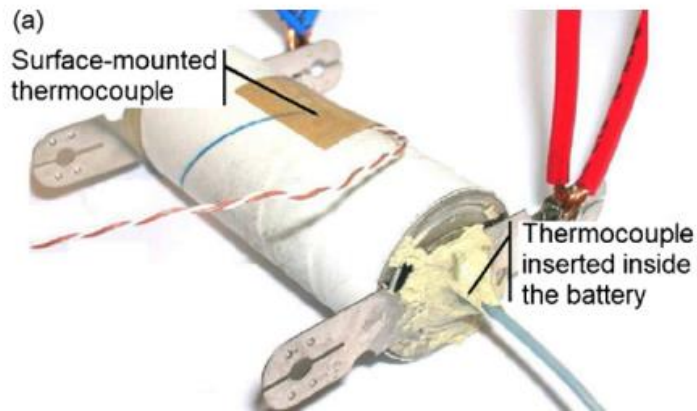


Definições formais – Estados de uma bateria

□ Estado de temperatura (SOT):

$$C_c \dot{T}_c = \dot{Q} + \frac{T_s - T_c}{R_c}$$

$$C_s \dot{T}_s = \frac{T_\infty - T_s}{R_u} - \frac{T_s - T_c}{R_c}$$



Fonte: C. Forgez et.al. “Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery”. Journal of Power Sources. 2010.

Definições formais – Estados de uma bateria

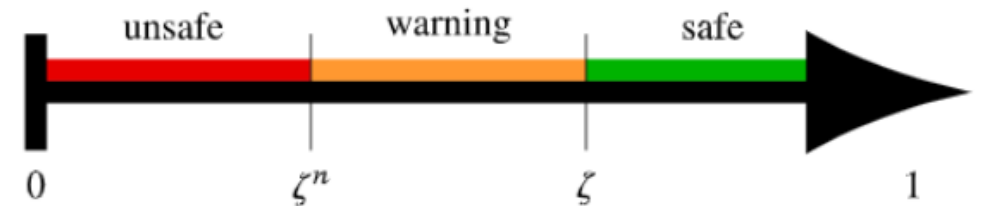
□ Estado (status) de segurança (SOS)

➤ Definição mais recente;

➤ Uso de funções de abuso;

➤ Índice que permite tomada de decisões;

➤ Desafio: análise multivariável → como combinar em um único índice?



SOS = 1.0 completely safe (all functions are 1.0),

SOS = ζ warning (one function may be at ζ),

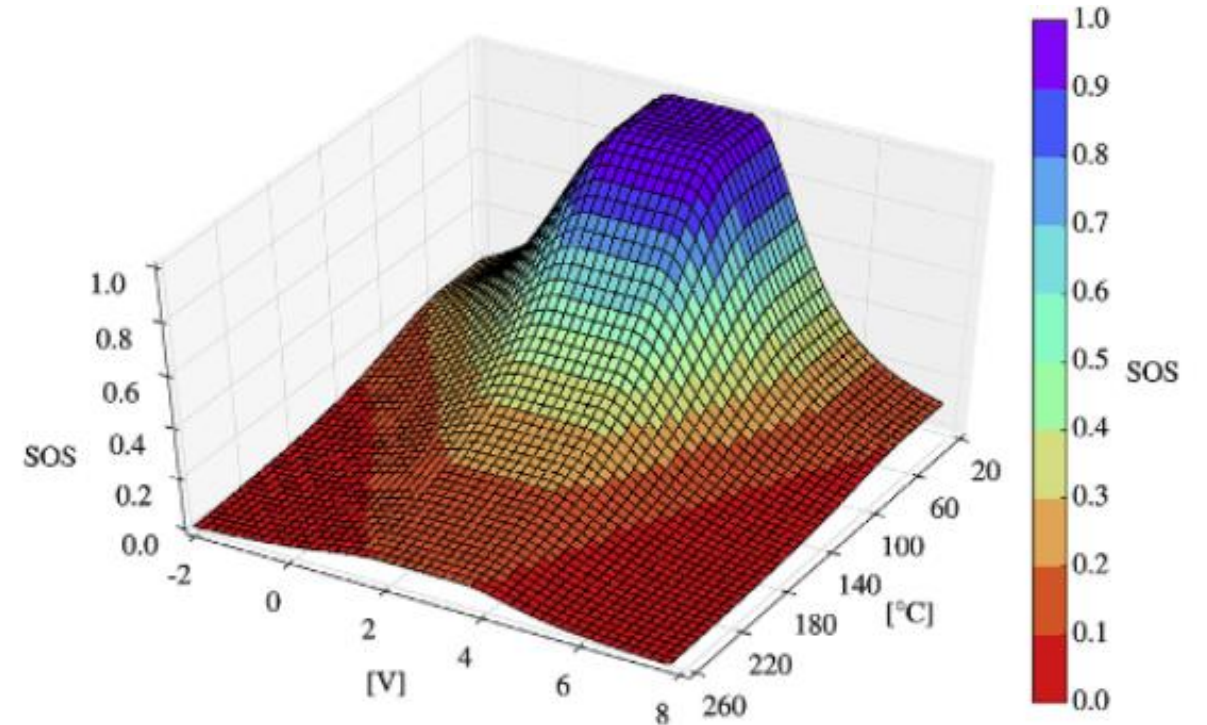
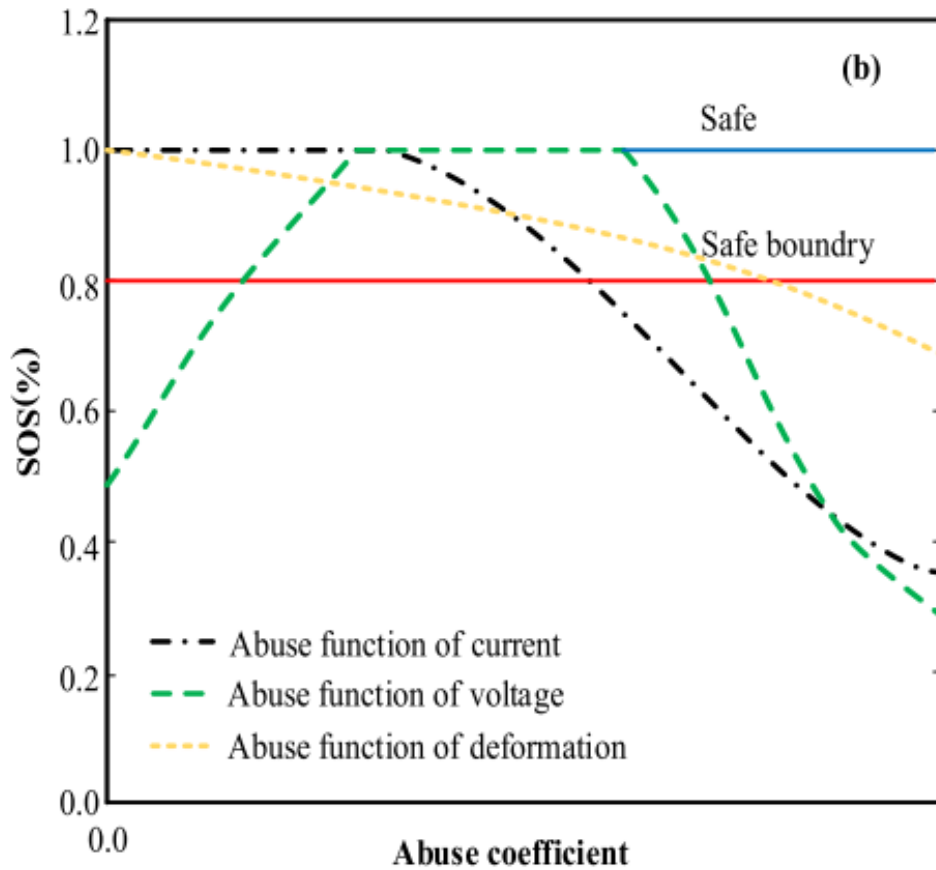
SOS = ζ^n minimum (all functions are ζ),

SOS < ζ^n unsafe (all functions are below ζ).

Fonte: E. Cabrera-Castillo et. al. “Calculation of the state of safety (SOS) for lithium-ion batteries.” Journal of Power Sources. 2016.

Exemplo de função de abuso

□ Estado (status) de segurança (SOS)



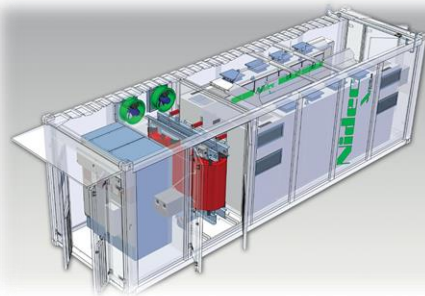
Fontes:

- [1] X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.
- [2] E. Cabrera-Castillo et. al.. "Calculation of the state of safety (SOS) for lithium-ion batteries." Journal of Power Sources. 2016.



(Alguns) métodos de estimação de carga

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Método de contagem de carga

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{I(t) \cdot \eta}{Q_n} dt$$

- ❑ Assume que a capacidade da bateria é conhecida (ou a eficiência coulômbica);
- ❑ Fácil implementação;
- ❑ Problemas:
 - Depende do conhecimento do estado de carga inicial;
 - Acúmulo de erro → recalibração.
- ❑ Método utilizado em combinação com outras técnicas (por exemplo, OCV).

Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Método baseado na tensão de circuito aberto (OCV)

❑ Baseia-se na relação entre a tensão da bateria e o estado de carga;

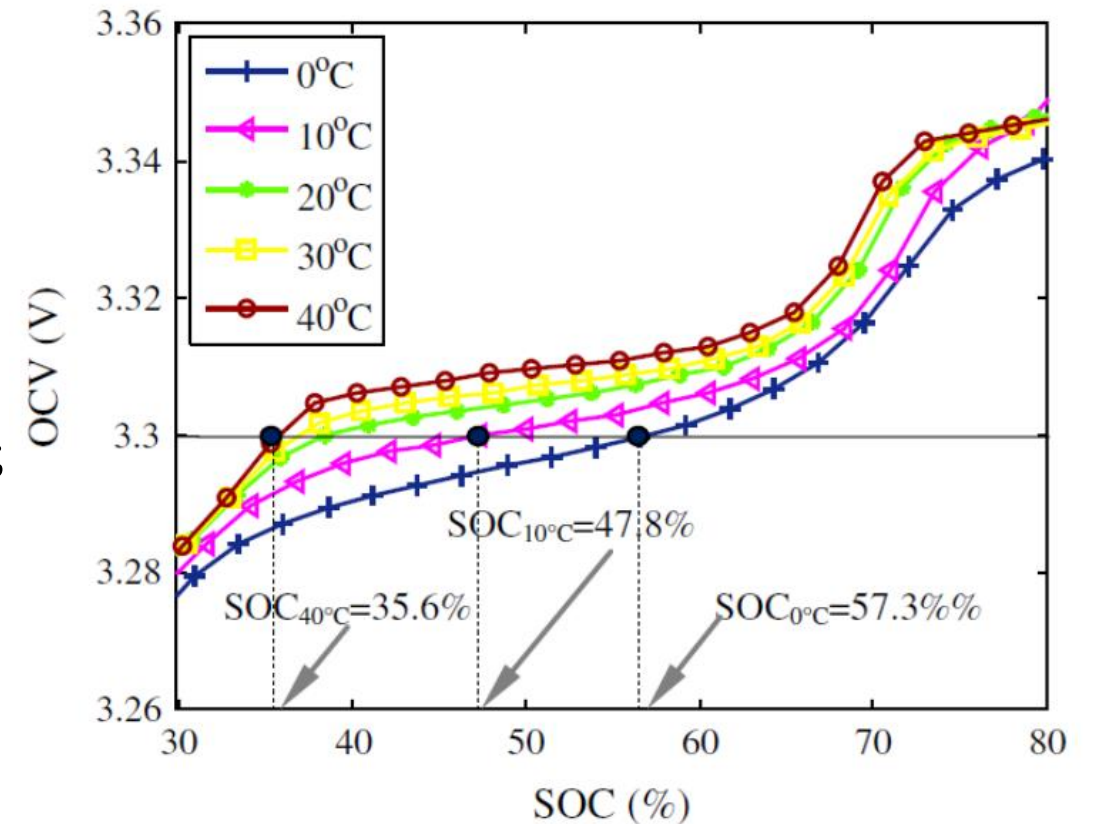
❑ Vantagens:

➤ Simplicidade;

➤ Pode ser combinado com a contagem de carga;

❑ Limitações

➤ OCV depende da temperatura e envelhecimento;



Fonte: J. Meng et. al. "An Overview of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-ion Batteries". OPTIM. 2017.

Método baseado na tensão de circuito aberto (OCV)

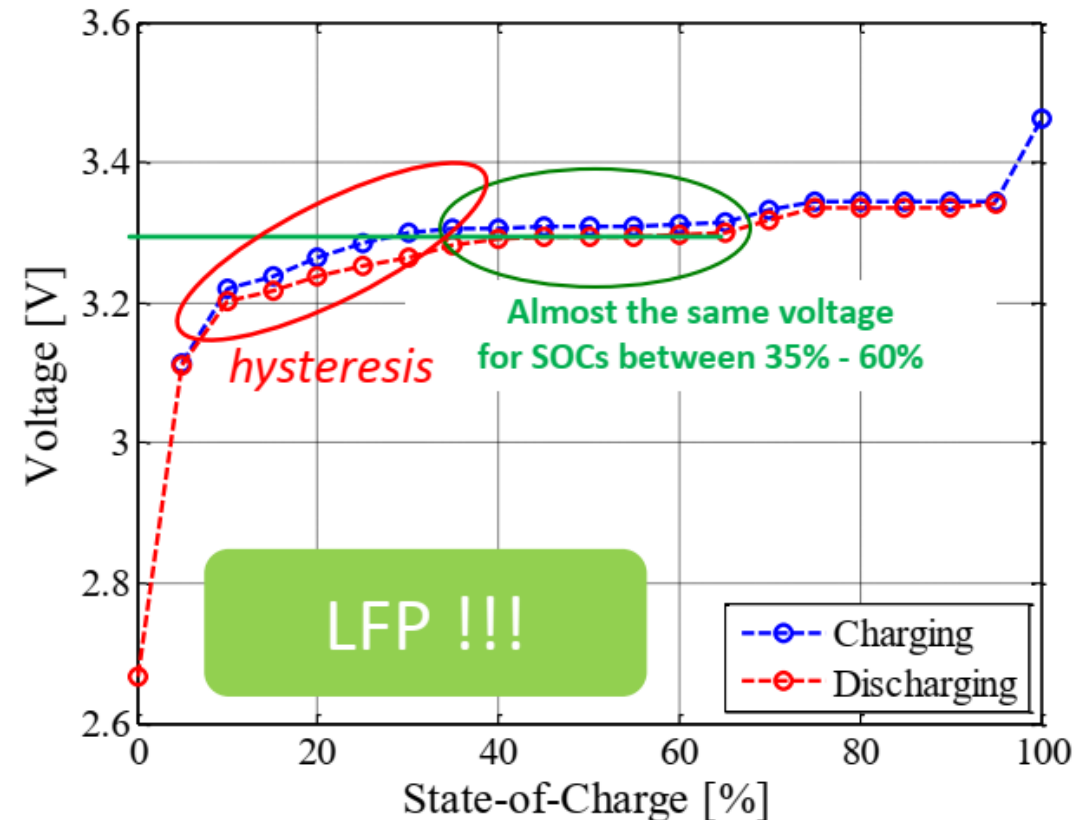
❑ Baseia-se na relação entre a tensão da bateria e o estado de carga;

❑ Vantagens:

- Simplicidade;
- Pode ser combinado com a contagem de carga;

❑ Limitações

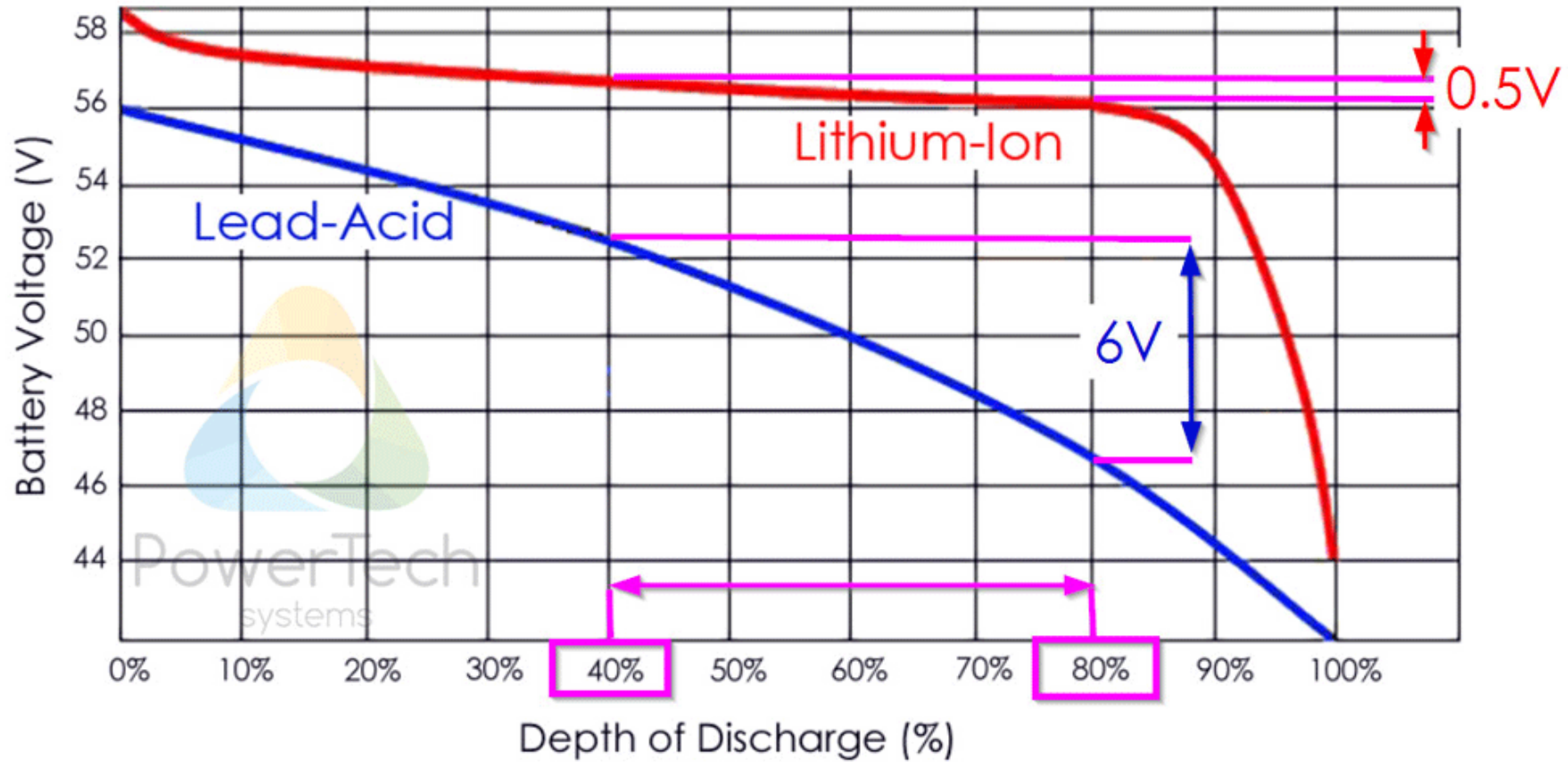
- OCV depende da temperatura e envelhecimento;
- Não aplicável em algumas químicas.



Fonte: J. Meng et. al. "An Overview of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-ion Batteries". OPTIM. 2017.

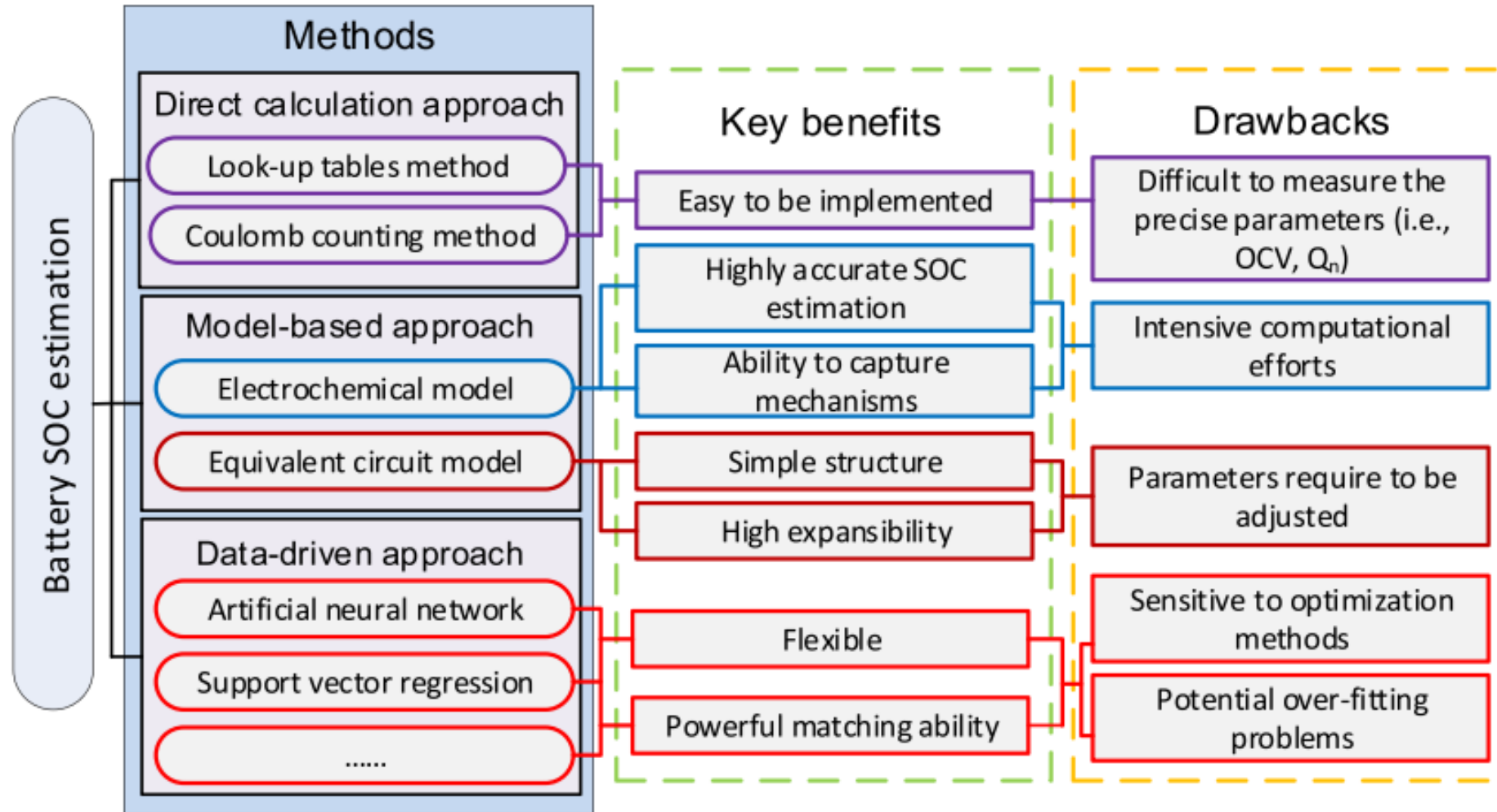
Comparação OCV – Chumbo ácido e Lítio íon

Open Circuit Voltage : Lithium-Ion vs Lead Acid



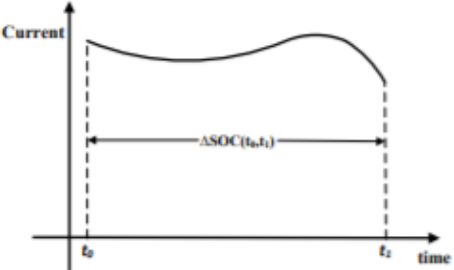
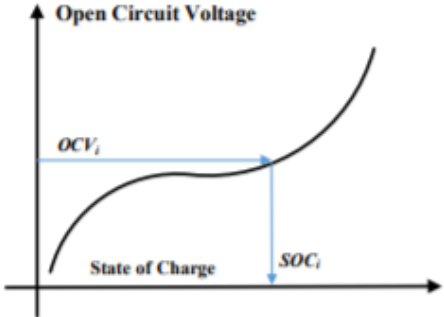
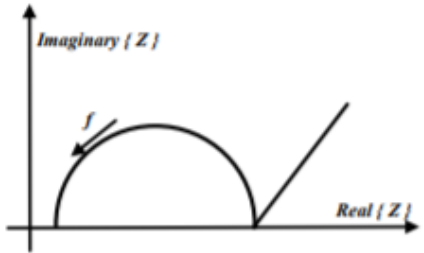
Fonte: PowerTech Systems.

Métodos de estimação de estado de carga



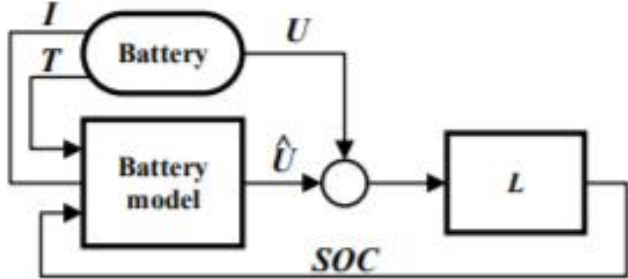
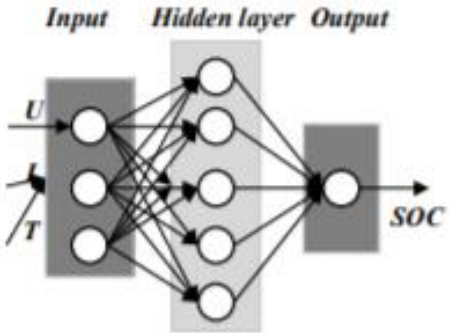
Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Comparação - métodos de estimativa de estado de carga

<i>Categories of Methods</i>	<i>Principles</i>	<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
Coulomb counting method		<ul style="list-style-type: none"> • Computational effectively; • Direct SOC calculation; • Easy to understand 	<ul style="list-style-type: none"> • Accurate initial SOC is needed; • Current sensor error accumulated during the process.
Open circuit voltage method		<ul style="list-style-type: none"> • One to one relationship between OCV and SOC; • Small amount of computation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Long relaxation time for OCV measurement; • Temperature, age and battery types affect the measurement result of OCV.
Impedance Spectroscopy based Method		<ul style="list-style-type: none"> • Sensitive to SOC variation; • Diverse parameters indicate SOC 	<ul style="list-style-type: none"> • Hard for online measurement; • Different with battery type, experimental condition, etc.

Fonte: J. Meng et. al. “An Overview of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-ion Batteries”. OPTIM. 2017.

Comparação - métodos de estimativa de estado de carga (cont.)

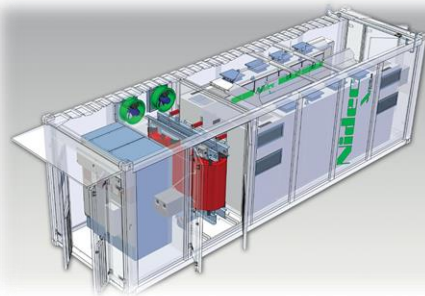
<i>Categories of Methods</i>	<i>Principles</i>	<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
<p>Model based method</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Insensitive to initial SOC; • good robust; • High accuracy 	<ul style="list-style-type: none"> • Rely on modeling accuracy; • High computation cost
<p>ANN based method</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Do not need previous knowledge about battery; • Easy transplant to hardware after offline training 	<ul style="list-style-type: none"> • Large amount of training samples is needed; • Hard to generalize to different driving cycles.

Fonte: J. Meng et. al. “An Overview of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-ion Batteries”. OPTIM. 2017.

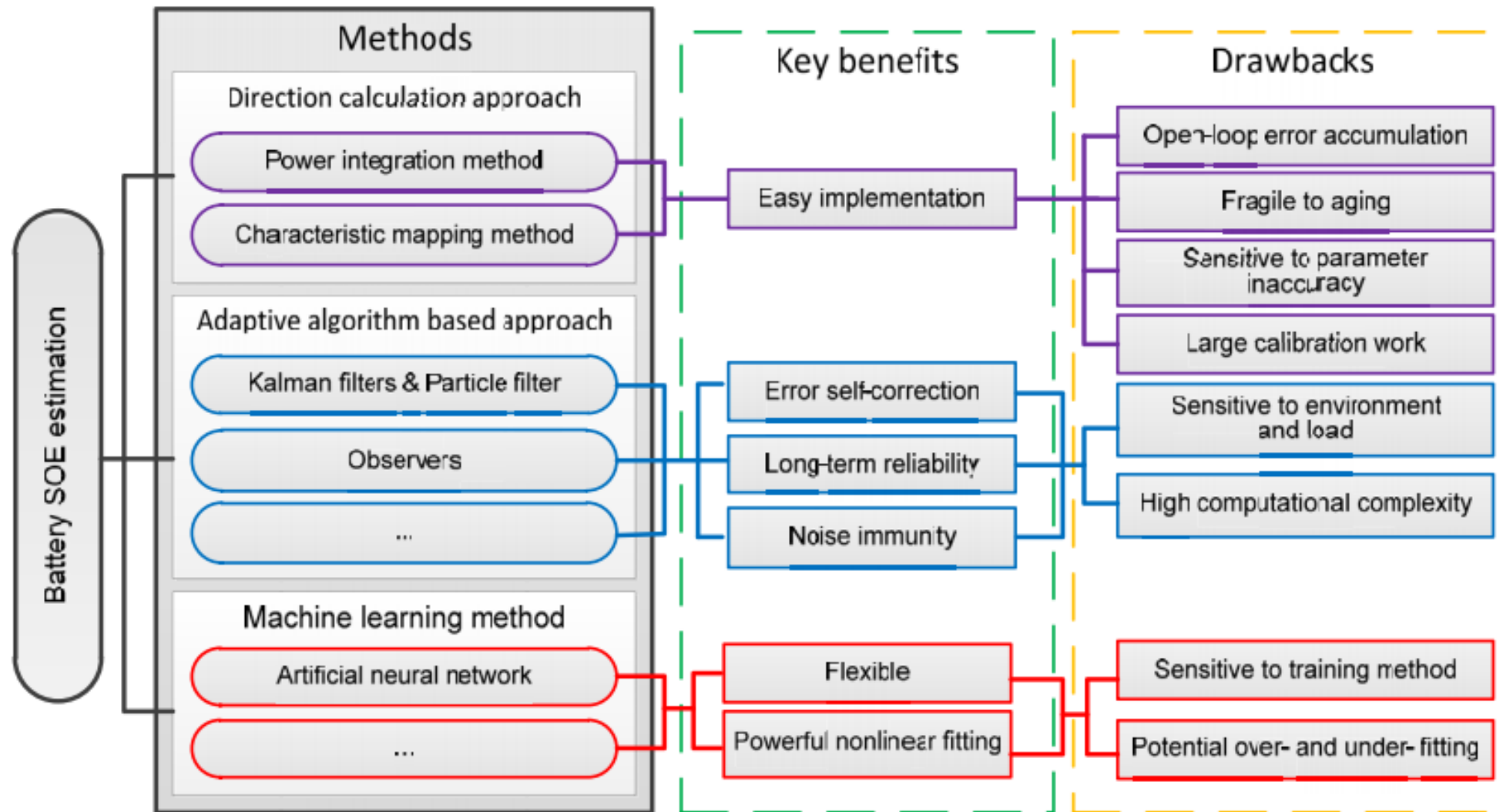


(Alguns) métodos de estimação de estados

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org

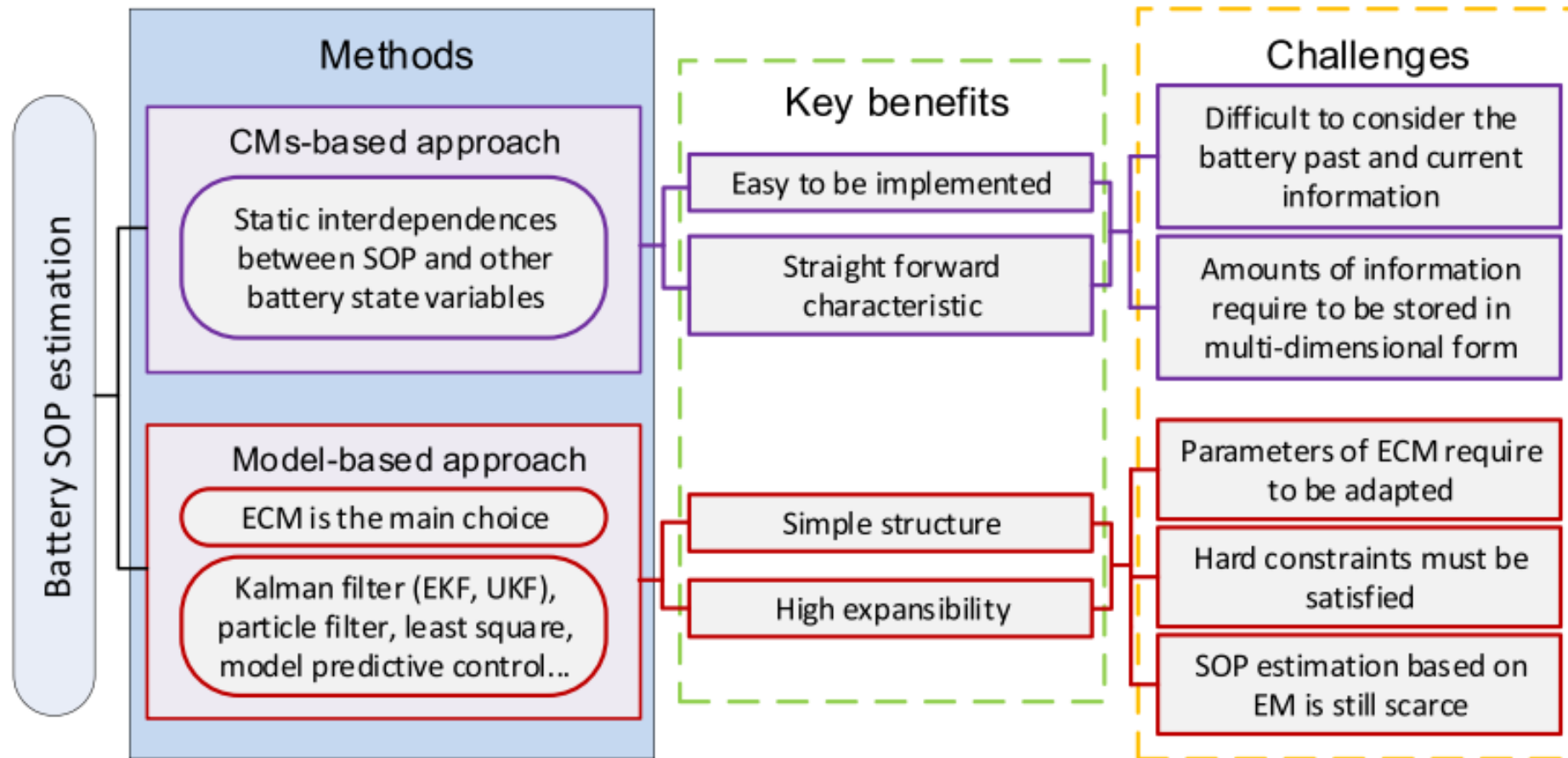


Estimadores de SOE



Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Estimadores de SOP

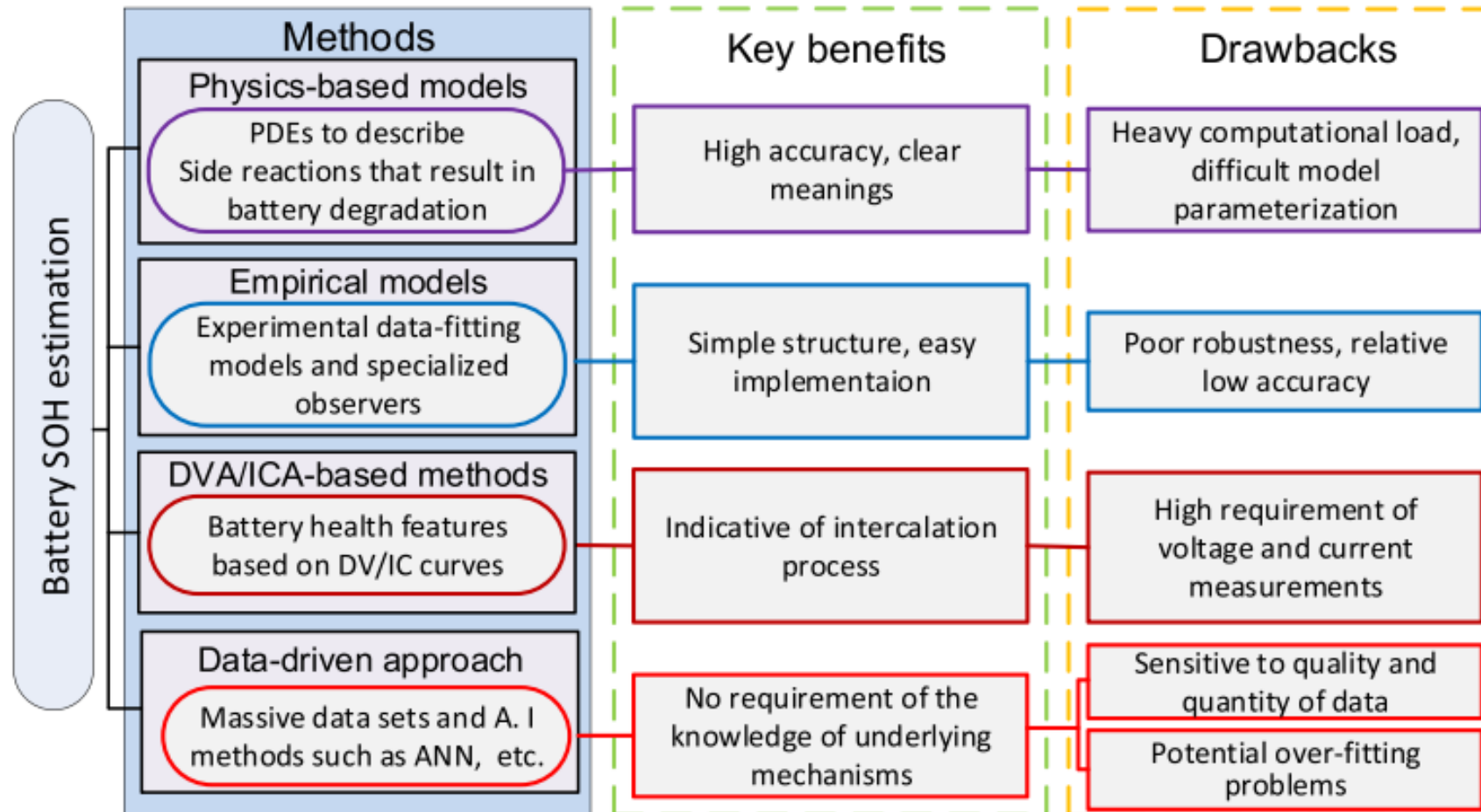


CM → mapa característico

ECM → modelo baseado em circuito equivalente

Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Estimadores de SOH

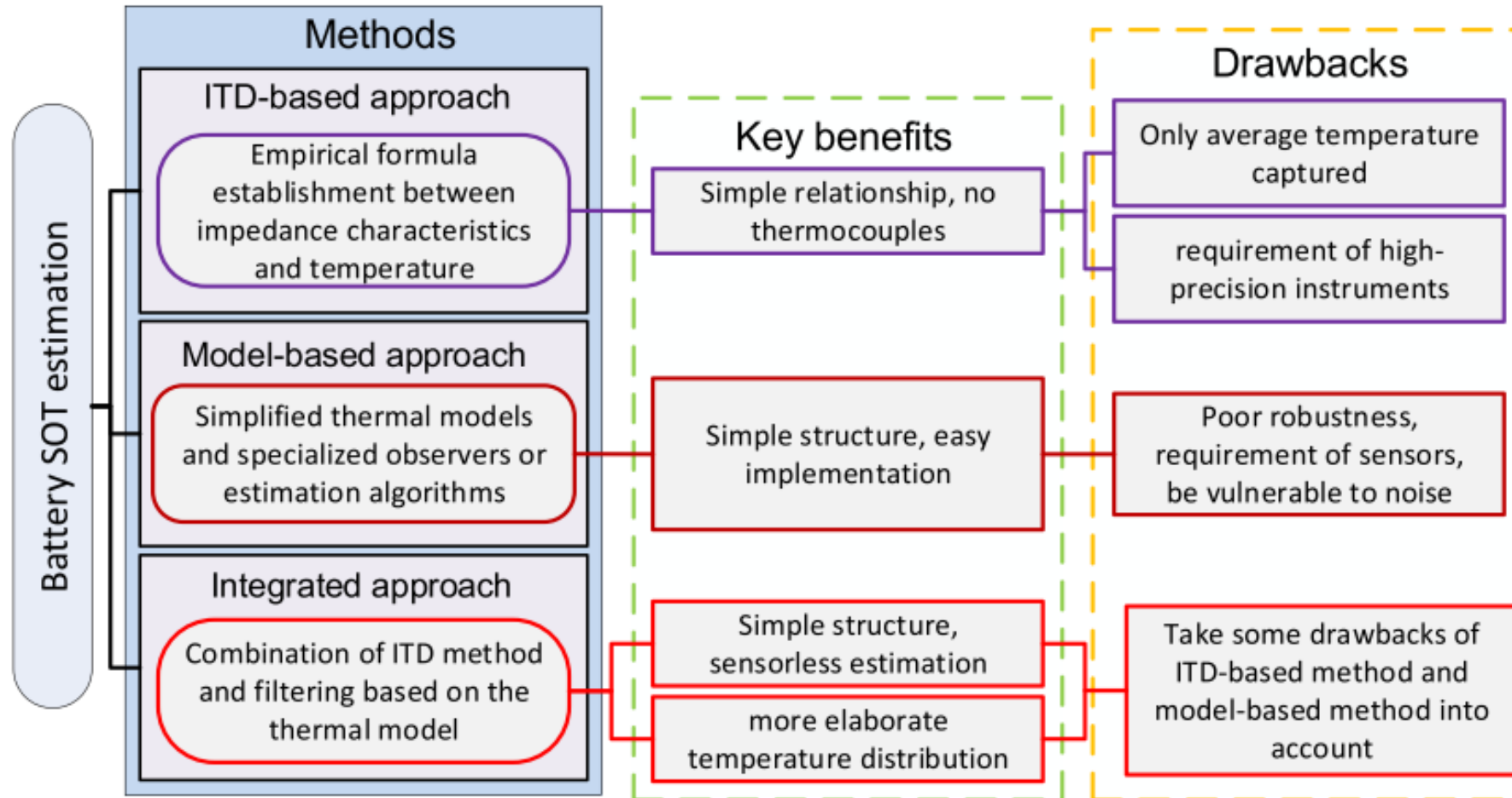


PDE → Equação diferencial parcial

ICA → análise de capacidade incremental

Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

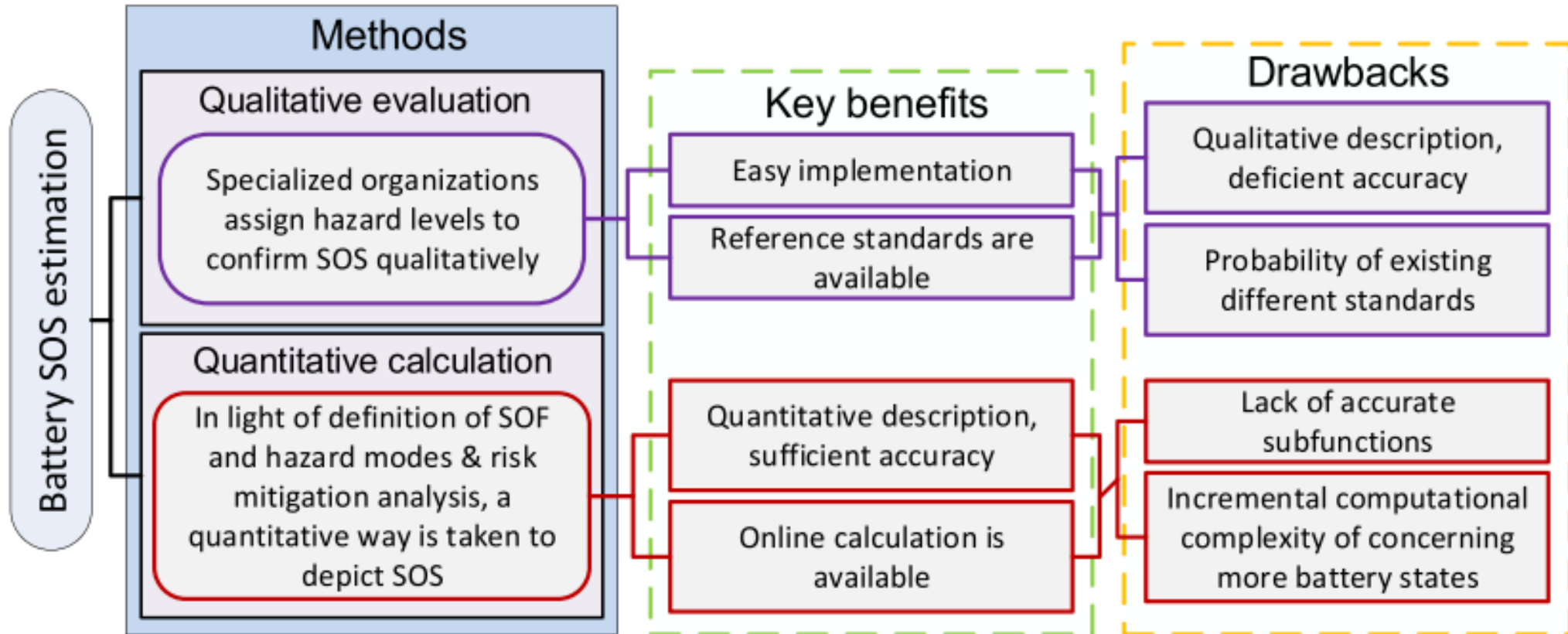
Estimadores de SOT



ITD → impedance-temperature detection

Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Estimadores de SOS



Fonte: X. Hu et. al. "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends." Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

Tendências futuras – Sistemas de monitoramento



Fontes:

[1] S. Park et. al.. “Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems”. Journal of Power Electronics. 2020.

[2] X. Hu et. al. “State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends.” Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.

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”