

# Modelagem e Otimização de Baterias Chumbo-Ácido em Aplicações Ferroviárias via Otimização por Big Data

Arthur Filgueiras de Oliveira



A EVOLUÇÃO  
PASSA  
POR AQUI

# Arthur Filgueiras de Oliveira

- Engenheiro eletricista pela UFJF.
- Especializado em Engenharia de Confiabilidade e *Lean Six Sigma*.
- Atualmente responsável pela Engenharia de Processos e Manutenção Baseada na Condição no Setor de Engenharia de Confiabilidade E.E. na MRS Logística S.A.

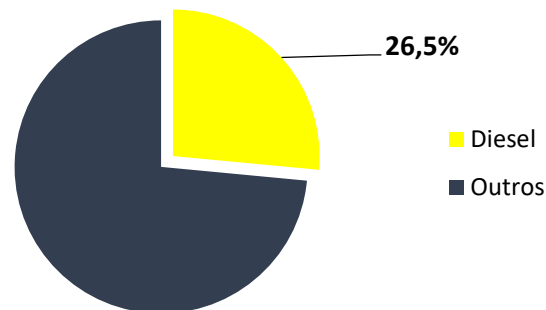
# Sumário

- Contextualização
  - Motivações.
  - Propostas do Trabalho.
- Modelo Representativo
  - Baterias Chumbo-Ácido (Fundamentos e principais características).
  - Circuito Elétrico Equivalente.
  - Testes de Extração dos Parâmetros.
- Desenvolvimento
  - Análise de Big Data (Telemetria da Locomotiva).
  - Validação da Modelagem.
  - Função Objetivo e Parametrização por Otimização de Algoritmos Genéticos.
- Testes e Resultados
  - Simulação de Monte Carlo (Análise Probabilística).
  - Critérios Adotados para a Obtenção dos Resultados.
- Conclusões
  - Análises Resultantes e Considerações Finais.
  - Estudos Futuros.
- Referências Bibliográficas

# Contextualização - Motivações

- Importância dos sistemas de armazenamento de energia
  - Eletrônica de Potência de Locomotivas.
- Desafios
  - Disponibilidade, confiabilidade, durabilidade e “previsibilidade”.
- Locomotivas GE-AC44i
  - Eficiência e Gestão Energética.

## Custos Operacionais MRS

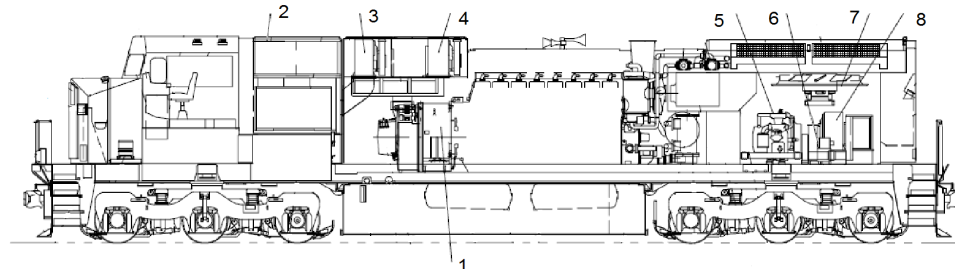


Fonte: Acervo MRS Logística S.A., 2015



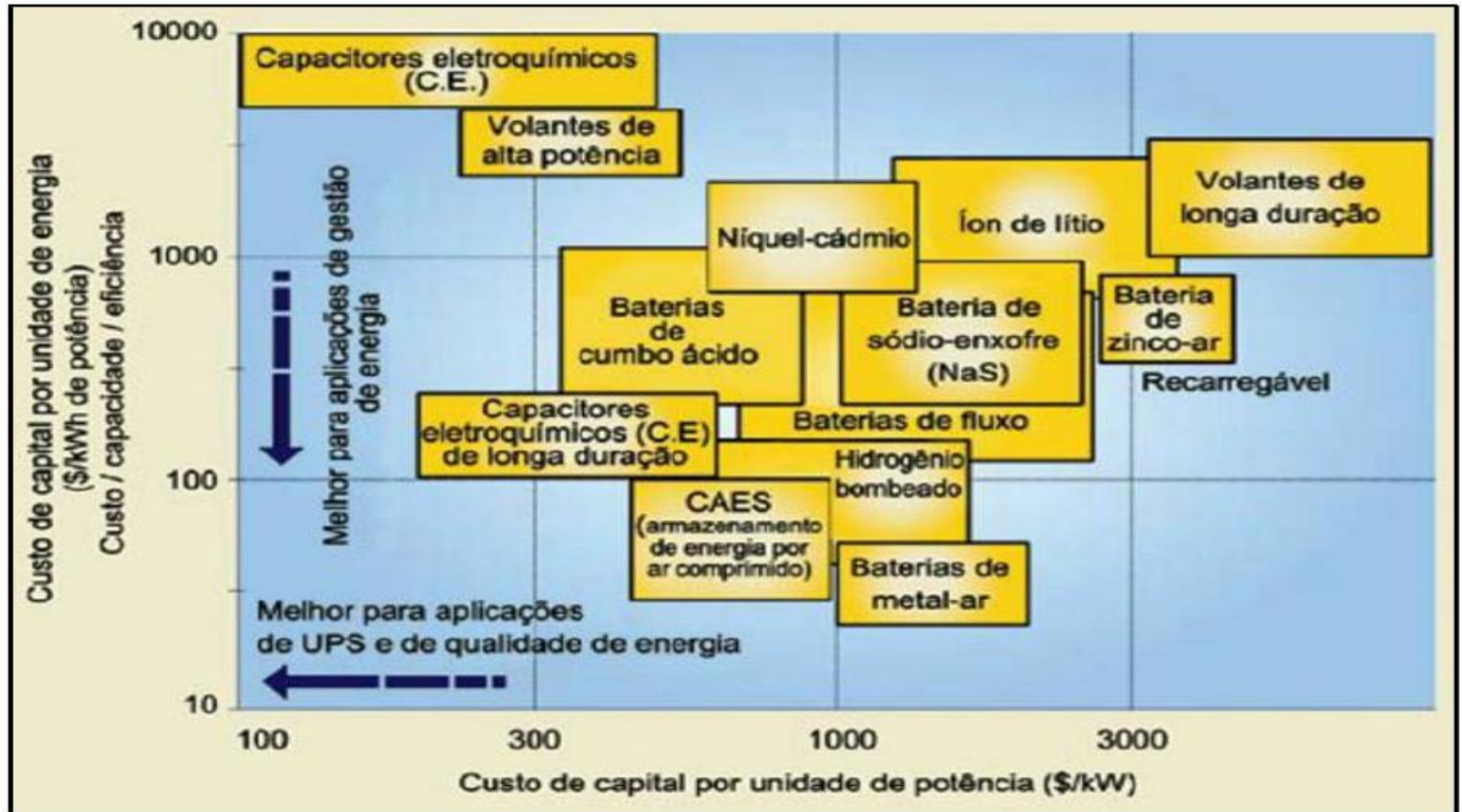
# Contextualização – Propostas do Trabalho

- Modelagem de Baterias Chumbo-Ácido Ferroviárias
  - Circuito elétrico equivalente e modelo estatístico.
- Otimização do banco de baterias
  - Expectância do tempo máximo em que o sistema pode ser submetido a descarga sem comprometer os demais componentes operacionais e o processo de partida do motor diesel.
  - Estender a vida útil do banco de baterias através de boas práticas.
- Análise de Probabilidade
  - Estudo dos processo de operação mais recorrentes.



Fonte: Manual elétrico locomotiva GE-AC44i®.

# Modelo Representativo - Fundamentos



Distribuição das tecnologias de armazenamento de energia em função dos custos de investimento por unidade de potência ou unidade de energia. Fonte: Estudos dos Sistemas de Armazenamento de Energia Alocados à Locomotivas Diesel-Elétricas Híbridas. BORBA, J.L., 2015.





# Modelo Representativo - Características

- Capacidade de Carga

$$I_n = 420 \text{ [Ah]} \div n \text{ [h]}$$

$$I_8 = 420 \text{ [Ah]} \div 8 \text{ [h]} = 52,5 \text{ [A]} = 420 \text{ [Ah]} \times 0,125$$

$$I_6 = 420 \text{ [Ah]} \div 6 \text{ [h]} = 70 \text{ [A]} \neq 420 \text{ [Ah]} \times 0,156 = 65,52 \text{ [A]}$$

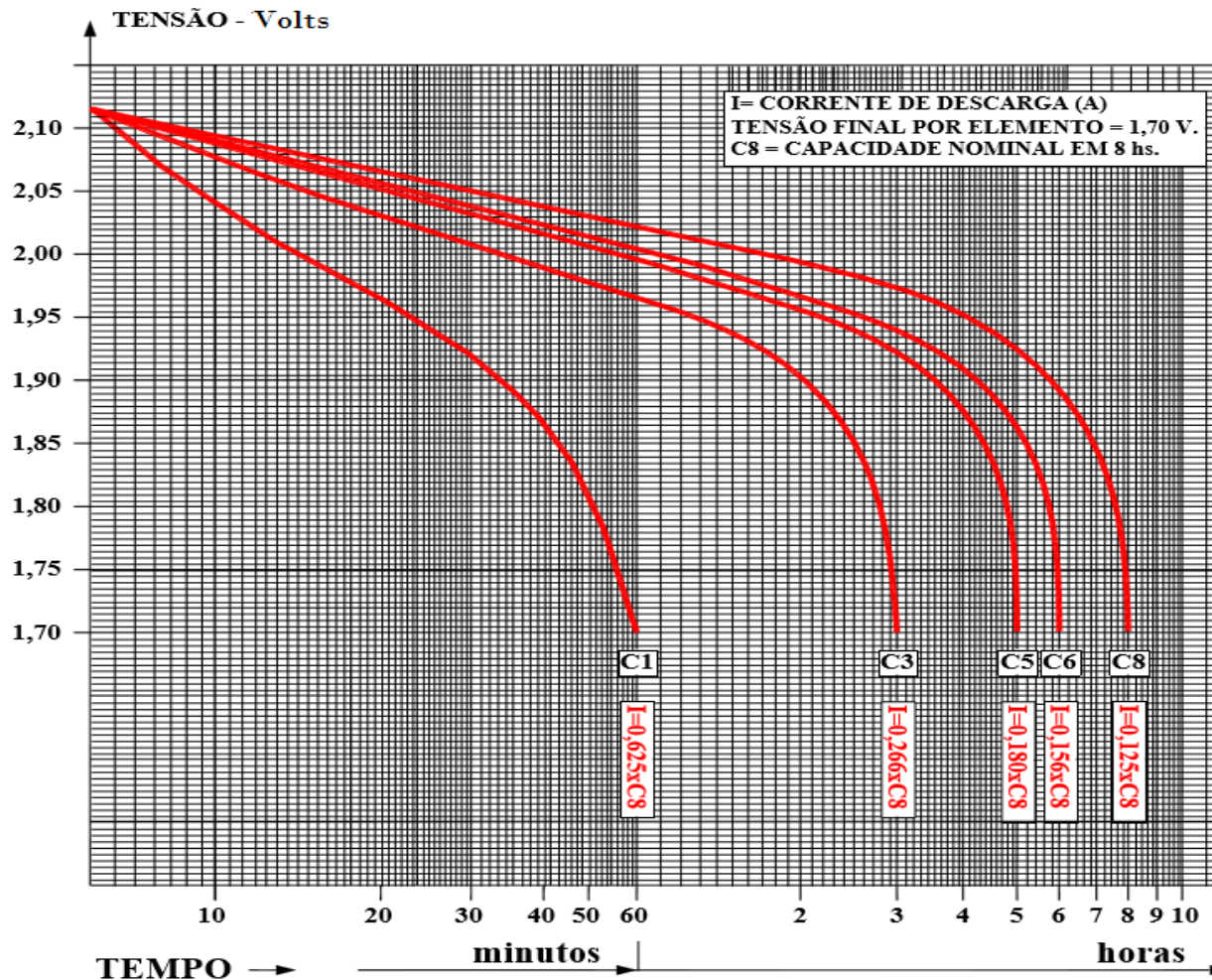


Fonte: Baterias Ferroviária, acervo pessoal 2016



# Modelo Representativo - Características

- Capacidade de Carga



Curva de descarga para diferentes regimes. Fonte: **Apresentação Bateria Ferroviária LOG SDL, BATERIAS INDUSTRIAIS**

# Modelo Representativo – Circuito Equivalente

- Estado de Carga (*SOC*)

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q} \int_0^t I(t) dt$$

- Modelo *CIEMAT*\*

$$V_{oc} = [2 - 0.16 \times SOC] + \frac{I_T}{Q} \times \left( \frac{6}{1 + I_T^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - SOC)^{1.2}} + 0.036 \right) \times (1 - 0.025 \Delta T)$$

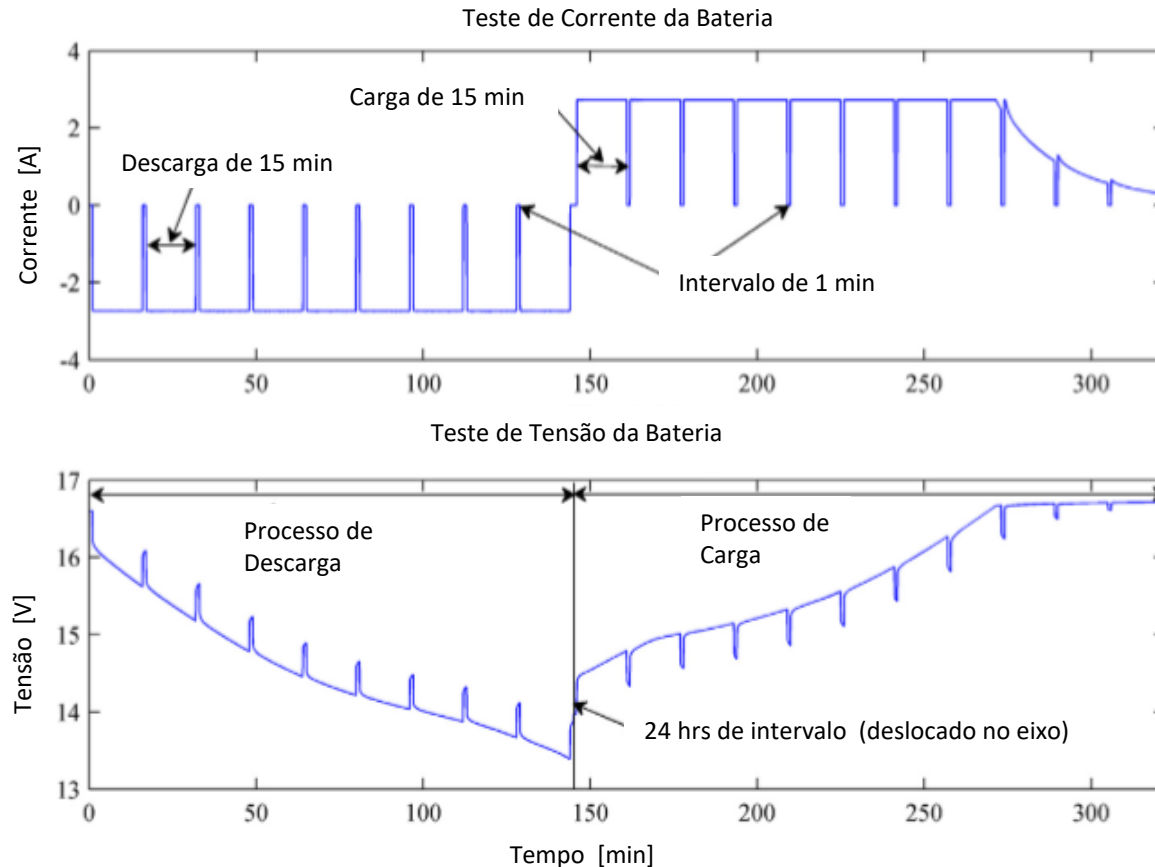
$$V_{oc} = [2.085 - 0.12 \times (1 - SOC)] + \frac{I_T}{Q} \times \left( \frac{4}{1 + I_T^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.02 \right) \times (1 - 0.007 \Delta T)$$

\* Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas



# Modelo Representativo - Parametrização

- Extração do Perfil  $SOC \times V_{OC}$

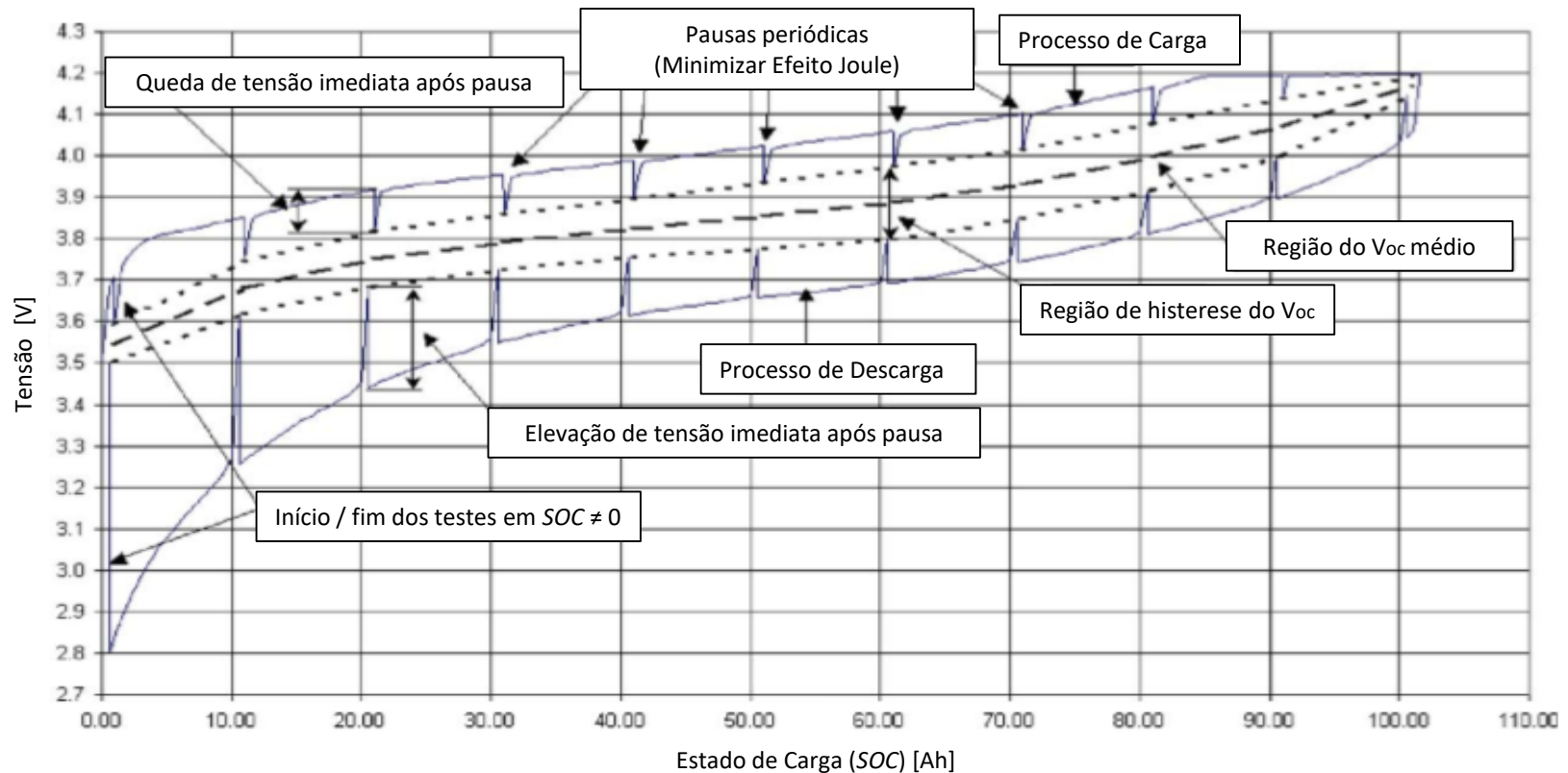


Perfis dos pulsos de corrente e curvas de tensão terminal dos processos de descarga e carga para a bateria estudada em: **Parameter Extraction and Characteristics Study for Manganese-Type Lithium-Ion Battery**, SOMAKETTARIN, N., FUNAKI, T.



# Modelo Representativo - Parametrização

- Extração do Perfil  $SOC \times V_{oc}$



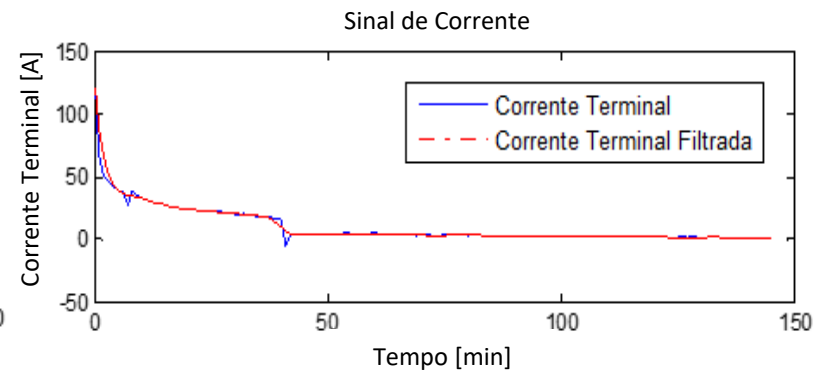
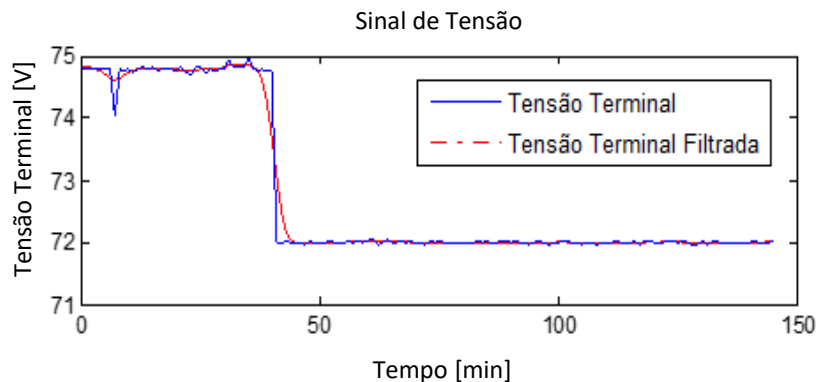
Região média de  $V_{oc}$  entre a curva de histerese formada pelo comportamento da tensão terminal nos processos de carga e descarga da bateria analisada em: **Rapid Test Non-Linear Model Characterization of Solid-State Lithium-Ion Batteries**, ABU-SHARKH, S., DOERFFEL, D.

# Desenvolvimento – Big Data (Telemetria)

- Manutenção Baseada na Condição da Telemetria da Locomotiva
  - Análise de Big Data no tratamento do amplo volume de variedade de dados em uma taxa de velocidade de proliferação das informações de performance geradas a partir da telemetria das locomotivas.
  - Estratégia de monitoramento contínuo e otimização da manutenção (programada e não invasiva) através de tendências estatísticas e dos históricos de padrões anteriormente identificados no banco de dados precedendo a falha do ativo.
  - Capaz de mapear as possibilidades do campo de atuação tornando de maneira intuitiva a tomada de decisão, estabelecendo assim um prognóstico mais sólido em termos gerenciais.

# Desenvolvimento – Big Data (Telemetria)

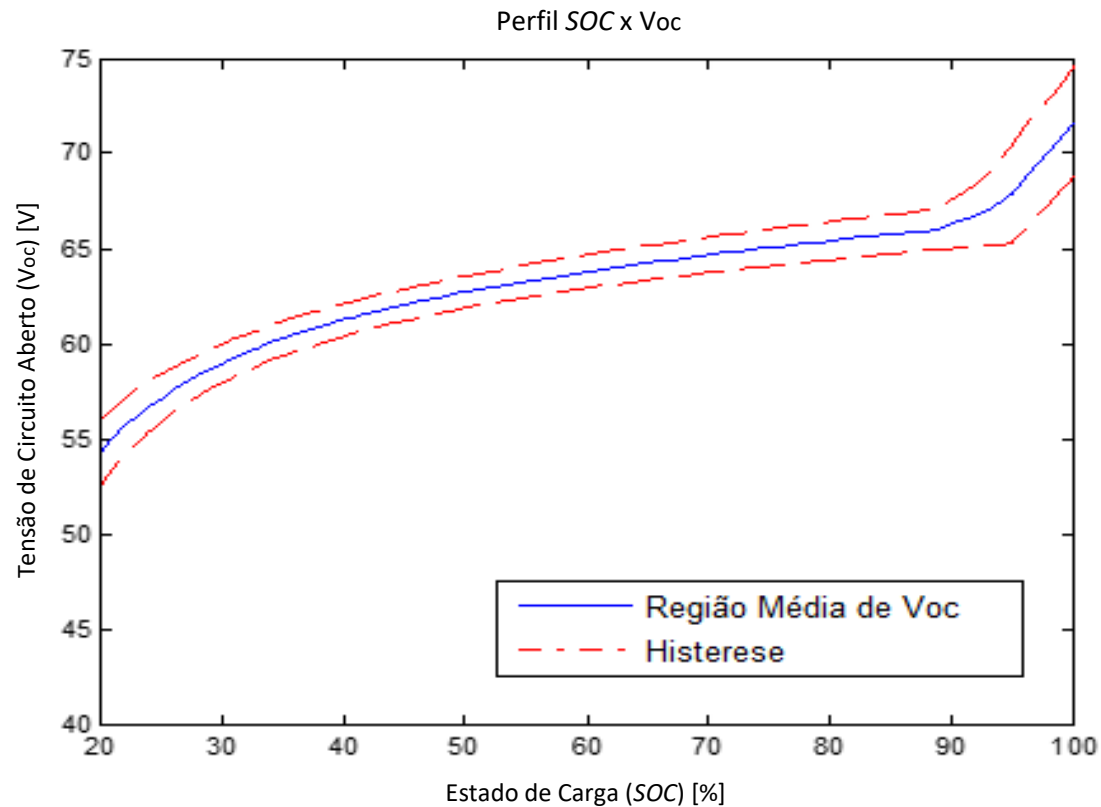
- Informações registradas pelo computador de bordo a serem analisadas no modelo equivalente
  - Temperatura Interna ( $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]).
  - Estado de Carga Inicial ( $\text{SOC}_0$  [Ah]).
  - Tensão Terminal ( $V_T$  [V]).
  - Corrente Terminal ( $I_T$  [A]).



Sinais de tensão e corrente filtrados nos terminais da bateria durante o processo de carga.  
Fonte: Telemetria da locomotiva GE-AC44i®.

# Desenvolvimento – Big Data (Telemetria)

## ○ Perfil $SOC$ x $V_{oc}$

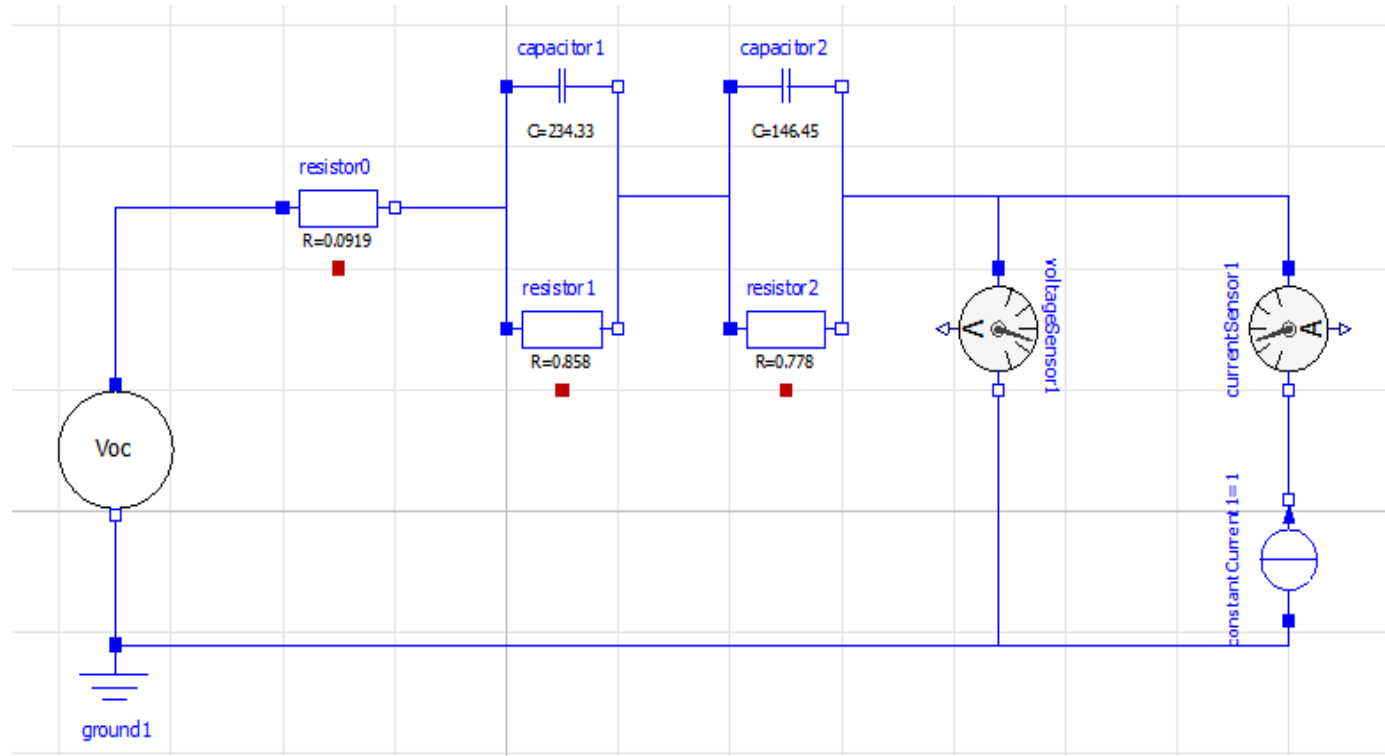


Perfil  $SOC$  x  $V_{oc}$  de uma amostragem segundo o modelo *CIEMAT*.  
Fonte: Telemetria da locomotiva GE-AC44i®.



# Desenvolvimento – Validação do Modelo

- Simulação comportamento sintético do modelo equivalente



Topologia do circuito elétrico equivalente construído para validação da modelagem através do software OPENMODELICA®.

# Desenvolvimento – Validação

- Simulação comportamento sintético

*Comparação entre os dados originais do comportamento sintético e os dados obtidos através da otimização.*

<b>Parâmetros ECM</b>	<b>Dados Originais</b>	<b>Dados Obtidos pela Otimização</b>	<b>Erro Associado (%)</b>	<b>Variável de Estado</b>	<b>Erro Médio Quadrático (%)</b>
R0	0,0919	0,0893	0,1619	Vt	0,0025
R1	0,858	0,835	0,0483	SOC	$4,156 \times 10^{-15}$
R2	0,778	0,6887	3,8574	Voc	$6,743 \times 10^{-7}$
C1	234,33	212,554	0,5715	Vc1	2,0886
C2	145,45	112,879	4,6128	Vc2	2,9377
Vc1(0)	0	0,4498	1,8854		
Vc2(0)	0	0,3967	1,0931		

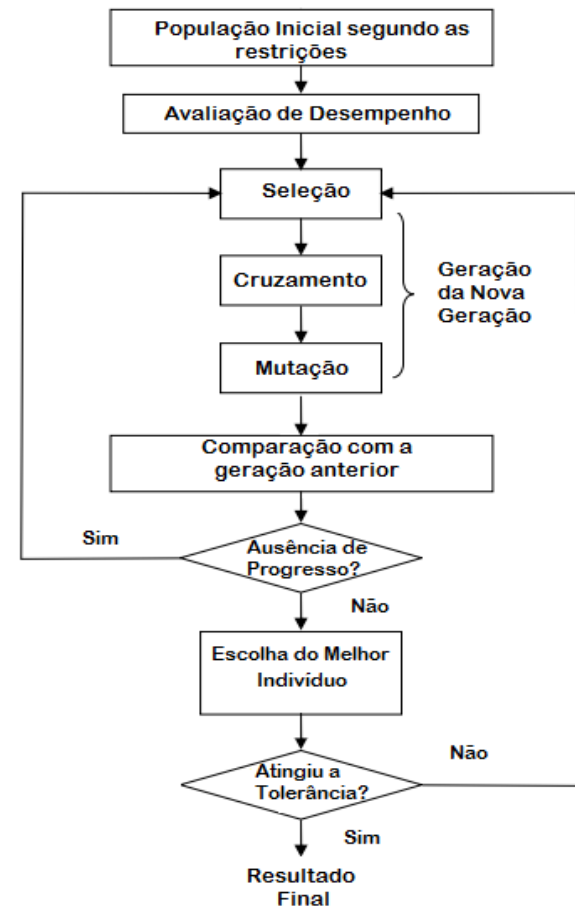
# Desenvolvimento – Otimização por A.G.

- Programação de otimização por Algoritmos Genéticos
  - Método Meta-heurístico inspirado na Teoria da Evolução.

Pai: 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 0 1 1  
Mãe: 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0

Filho 1: 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1  
Filho 2: 0 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0

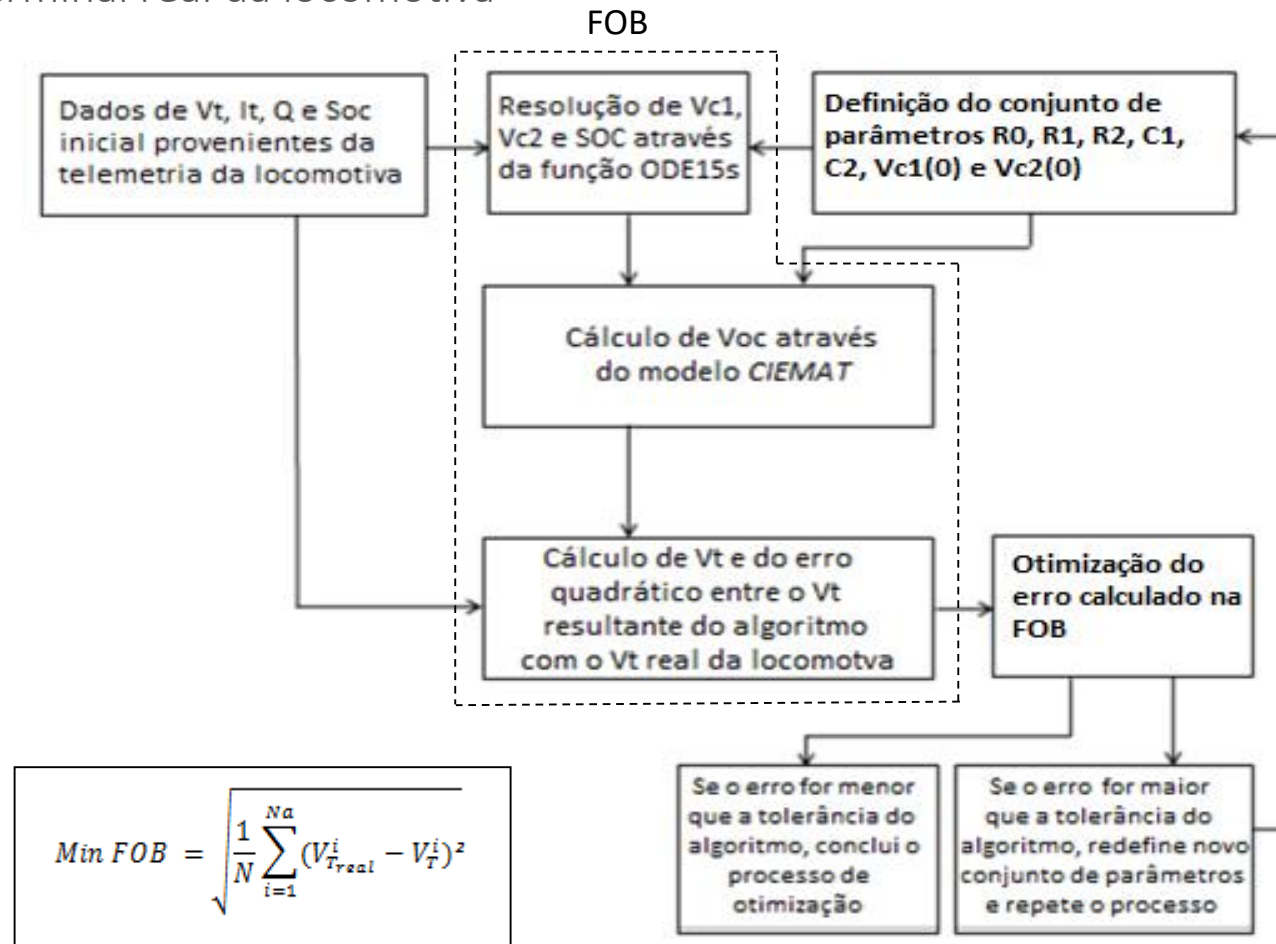
Crossover dos bits entre os pais na geração dos filhos.



Fluxograma de uma otimização via algoritmos genéticos

# Desenvolvimento – Função Objetivo

- A Função Objetivo consiste na minimização do erro médio quadrático, entre a tensão terminal obtida da simulação da bateria e a tensão terminal real da locomotiva

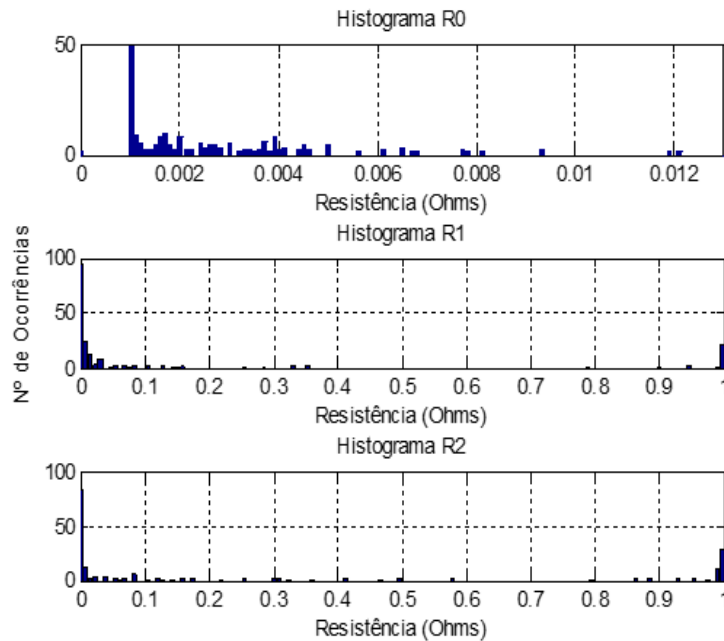


Fluxograma dos procedimentos da função objetivo da otimização na extração dos parâmetros da bateria

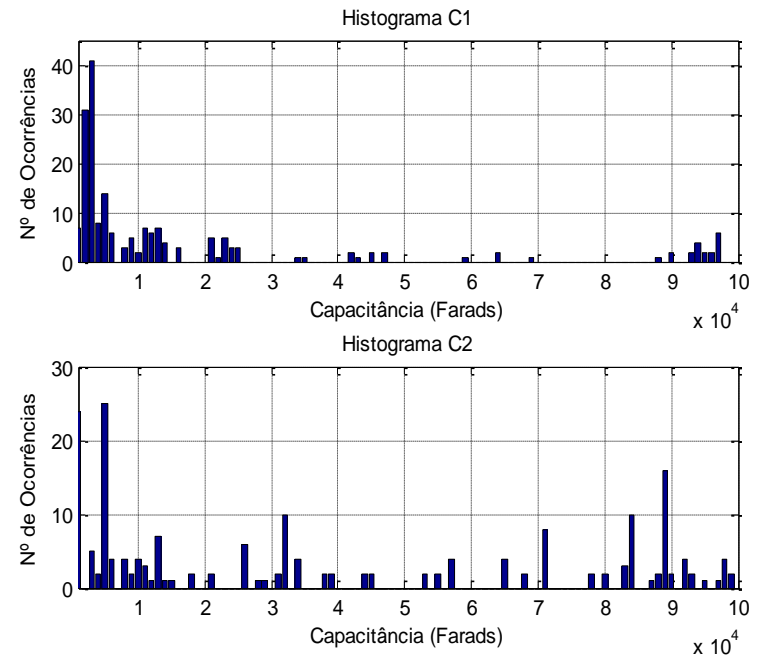


# Testes e Resultados – Simulações Monte Carlo

- Resultado das Simulações de Monte Carlo para os processos de otimização via algoritmos genéticos



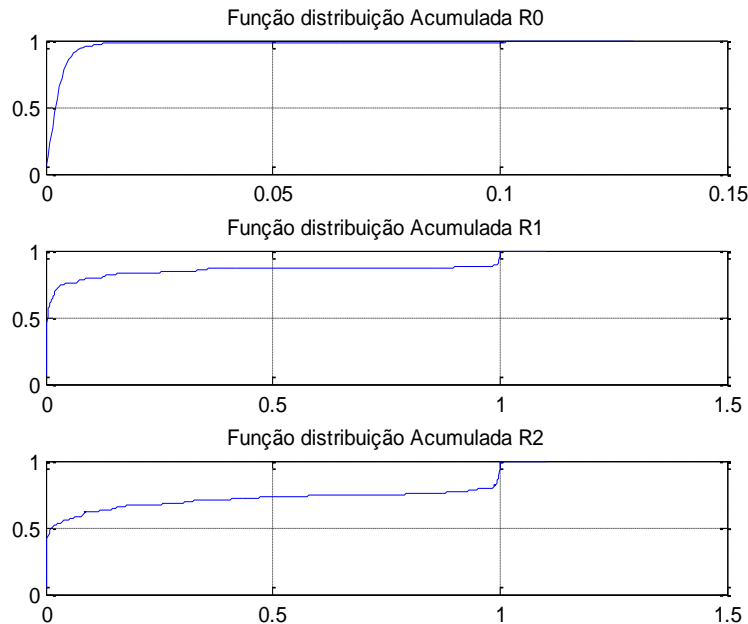
Histogramas de  $R_0$ ,  $R_1$  e  $R_2$ .



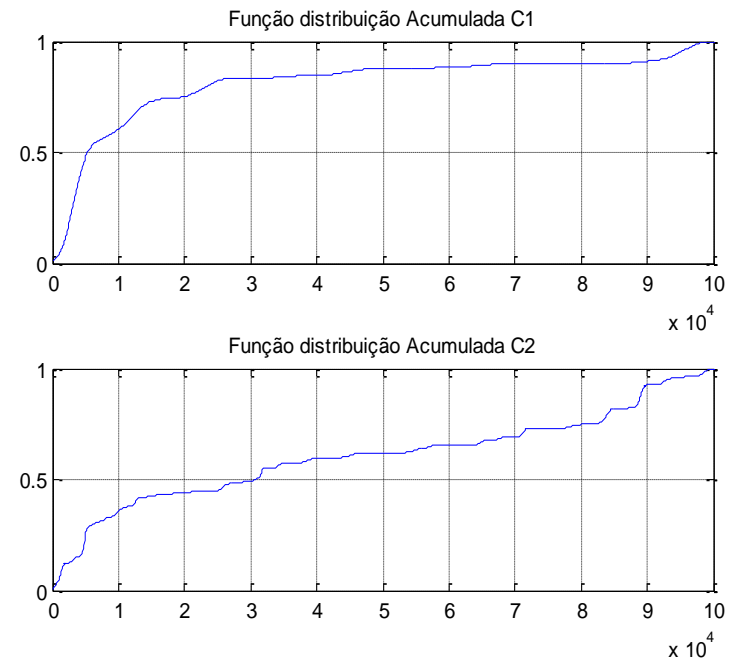
Histogramas de  $C_1$  e  $C_2$ .

# Testes e Resultados – Análise Probabilística

- Curvas das funções de distribuição acumuladas dos histogramas dos parâmetros da bateria através da distribuição de probabilidade Weibull bi-paramétrica



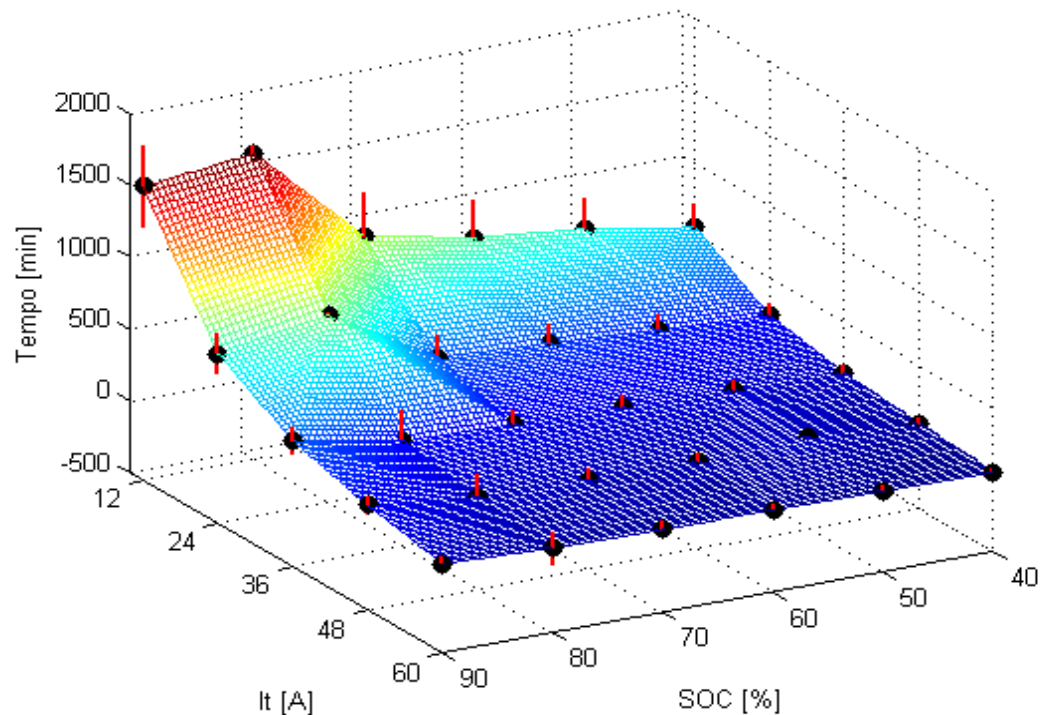
Curvas das funções de distribuição acumulada dos parâmetros  $R_0$ ,  $R_1$  e  $R_2$ .



Curvas das funções de distribuição acumulada dos parâmetros  $C_1$  e  $C_2$ .

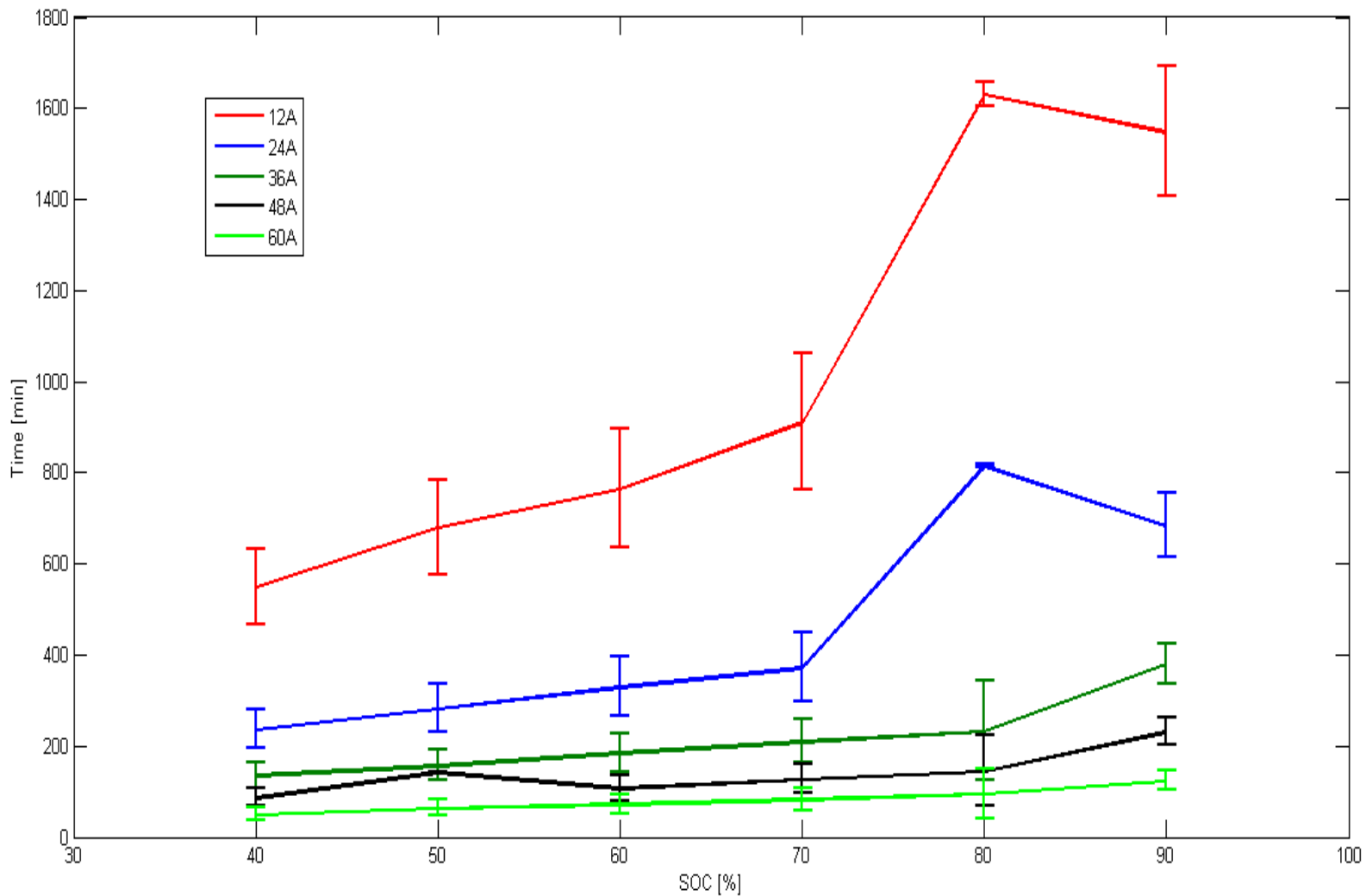
# Testes e Resultados – Critérios Adotados

- Construção de 30 cenários operacionais
  - Seis variações do *SOC* entre 40% e 90% igualmente espaçados em 10%.
  - Cinco variações da corrente de descarga entre 12A e 60A igualmente espaçadas em 12A.



Superfície dos tempos limites de descarga em função de *SOC* e *It*

# Testes e Resultados – Critérios Adotados



Mapeamento do desvio padrão do tempo limite de descarga em função do SOC de acordo com cada corrente drenagem.



# Conclusões – Análises Resultantes

Resultados obtidos via SMC conforme metodologia proposta

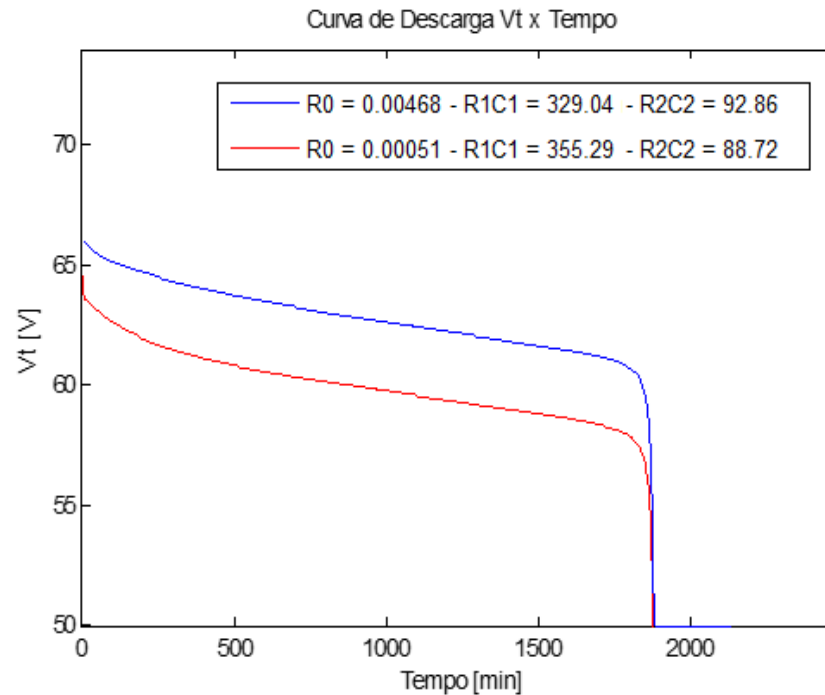
SOC [%]	Corrente [A]	Expectância do Tempo [min]	Valor Médio do Tempo [min]	Desvio Padrão do Tempo [%]	Número de Simulações
90	12	1548,9985	1589,8031	35,694	10000
	24	684,6458	677,0076	20,3771	1695
	36	380,7050	374,9493	23,3829	2279
	48	231,6755	239,5474	25,8572	1278
	60	125,0101	147,3551	29,8948	2324
80	12	1632,0705	1632,0704	<b>9,3421</b>	2314
	24	816,1546	816,1546	<b>13,6224</b>	2163
	36	233,2782	233,2782	46,6669	2495
	48	146,0978	146,0978	35,6103	1843
	60	95,3188	95,3187	<b>8,9077</b>	2272
70	12	912,1063	912,1064	<b>3,3066</b>	2773
	24	373,0238	373,0235	40,8289	2589
	36	210,6384	210,6382	45,8149	2441
	48	128,4059	128,4055	51,7526	2493
	60	83,6251	83,6250	58,4548	2062
60	12	765,6873	765,6872	33,8196	1775
	24	330,6972	330,6971	38,9294	2063
	36	185,0959	185,0958	44,5512	2322
	48	108,2587	108,2586	51,4674	2462
	60	73,4041	73,4041	57,8510	2726
50	12	680,3448	680,3449	30,7180	2182
	24	282,8406	282,8406	37,8197	2091
	36	158,2637	158,2637	42,9483	2263
	48	142,7767	142,7767	<b>6,8281</b>	916
	60	64,5608	64,607	54,3809	2485
40	12	549,4937	549,4936	30,1825	2936
	24	237,5143	237,5143	34,8576	2622
	36	136,0458	136,0458	40,3778	1499
	48	87,7665	87,7665	44,3368	1905
	60	50,0429	50,0429	55,3846	2204

# Conclusões – Análises Resultantes

- Números reduzidos de amostras dos dados de operação da locomotiva em certos intervalos resultaram em desvios padrão mais elevados.
- Aumento do espaço amostral que pode reduzir estes desvios e aumentar o grau de confiança do modelo proposto.
- Podemos notar menor erro percentual para operações mais usuais (corrente terminal próxima de 12A e estado de carga na casa de 80%).
- Os intervalos com maior margem de erro são os de corrente terminal igual 60A nos estados de carga entre 40% e 70%, e para corrente terminal igual 48A nos estados de carga entre 60% e 70%.

# Conclusões – Análises Resultantes

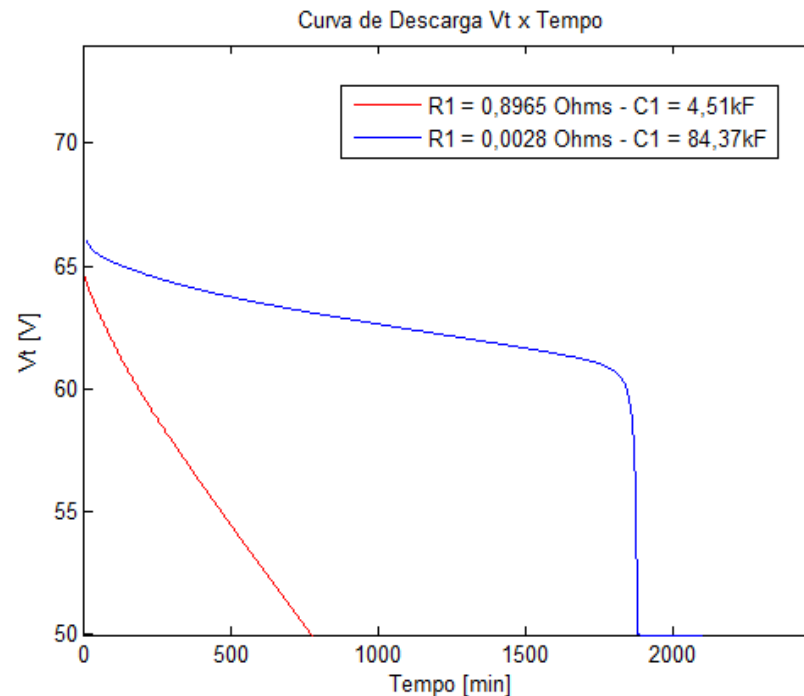
- O conjunto de parâmetros  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  e  $C_2$  caracterizam um ECM em que pelo menos um dos pares  $RC$  tem valor elevado de resistência (até  $1\Omega$ ), enquanto que a respectiva capacitância é da ordem de  $10\text{kF}$  a  $100\text{kF}$ .
- A resistência série colabora na queda da tensão terminal de forma mais linear sem muita alteração no comportamento dinâmico da curva de descarga devido a representação do Efeito Joule.



Comparação entre as curvas de tensão terminal para diferentes valores de  $R_0$ .

# Conclusões – Análises Resultantes

- O conjunto de pares RC influenciam na dinâmica da descarga de forma mais severa pela representação das reações eletroquímicas.
- Números destoantes de RC irão representar modelos químicos e aplicações também destoantes em relação a atividade fim que se deseja explorar na simulação.



Comparação entre as curvas de descarga da tensão terminal em função do tempo para as constantes de tempo  $R_1C_1$  igual a 4005 min e  $R_1C_1$  igual a 244.25 min.



# Conclusões – Análises Resultantes

- Os desvios padrão obtidos para as variáveis de otimização indicam determinado nível de incerteza quanto ao modelo da bateria.
- Opções para redução do desvio padrão e melhoria do trabalho:
  - Aumento de amostras relativas aos cenários de operação estudados.
  - Escolha por um modelo alternativo ao *CIEMAT* utilizado para reavaliar os resultados.
  - Implementação de outro método de programação para a parametrização e otimização da bateria como redes neurais artificiais (*ANN*).
- Apesar das adversidades, a metodologia proposta mostrou-se promissora para determinar o complexo comportamento dinâmico dos sistemas de armazenamento de energia das baterias ferroviárias durante diferentes processos como o de descarga segundo as demandas exigidas.

# Referências Bibliográficas

- KROEZE, R. C., KREIN, P. T. “Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulation”. IEEE University of Illinois. Urbana-Champaign, 2008.
- HURIA T., CERAOLO, M., GAZZARRI, J., JACKY, R. “High Fidelity Electric Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells”. IEEE University of Pisa. Pisa, 2012.
- EINHORN, M., CONTE, F. V., KRAL, C., FLEIG, J. “Comparison, Selection and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications”. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 3, Mar. 2013.
- SOMAKETTARIN, N., FUNAKI, T. “Parameter Extraction and Characteristics Study for Manganese-Type Lithium-Ion Battery”. International Journal of Renewable Energy Research, vol.5, no. 2, Mar. 2015.
- DEVARAKONDA, L., WANG, H., HU, T. “Parameter Identification of Circuit Models for Lead-Acid Batteries Under Non-Zero Initial Conditions”. American Control Conference. Portland, 2014.
- LI, J., MAZZOLA, M.S. “Accurate Battery Pack Modeling for Automotive Applications”. Journal of Power Sources, Mississippi State University. Oktibbeha County, 2013.
- COPETTI, J. “Modelado de Acumuladores de Plombo-Ácido para Aplicaciones Fotovoltaicas”. Tese de Doutorado, Universidad Politécnica de Madrid, 1993.
- ACHAIBOU, N., HADDADI, M., MALEK, A. “Lead-Acid Batteries Simulation Including Experimental Validation”. Journal of Power Sources, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- HENTUNEN, A., LEHMUSPELTO, T., SUOMELA, J. “Time-Domain Parameter Extraction Method for Thévenin-Equivalent Circuit Battery Models”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, no. 3, Sep. 2014.
- MATHWORKS. “ODE15s - User’s Guide”. (Disponível em : [https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode15s.html?searchHighlight=ode15s&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode15s.html?searchHighlight=ode15s&s_tid=doc_srchtile). Acesso em 3 dez 2016).
- MATHWORKS. “Genetic Algorithm Terminology - User's Guide”. (Acesso em 3 dez 2016 - Disponível em: [https://www.mathworks.com/help/gads/some-genetic-algorithm-terminology.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/gads/some-genetic-algorithm-terminology.html?s_tid=srchtitle)).
- BILLINTON, R., ALLAN, R., “Reliability Evaluation of Power Systems”. Springer, 2ª ed., 1996.