

## **Influência da Arquitetura de Redes Neurais no Desempenho de Modelos de Envelhecimento de Bateria de Satélites em Simuladores Operacionais**

Italo Pinto Rodrigues<sup>1</sup>; 0000-0002-6832-8358  
Gabriel Alberto Rodrigues<sup>1</sup>; 0009-0008-6651-7156  
Thalisson Wendel da Silva Nascimento<sup>1</sup>; 0009-0007-1191-7032  
João Gabriel dos Santos Dias Moura Matos<sup>1</sup>; 0009-0000-2270-6010  
Bruno Lima dos Santos<sup>1</sup>; 0009-0002-1808-2369

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.  
[italoprodriques@gmail.com](mailto:italoprodriques@gmail.com) (contato principal)

**Resumo:** Este trabalho investiga a influência da arquitetura de redes neurais artificiais (RNAs) na modelagem do envelhecimento de satélites em simuladores operacionais. Foram avaliadas três arquiteturas distintas: uma simples (6x1x1x1x1), uma complexa (6x10x10x10x1) e uma intermediária (6x9x2x1), esta última previamente identificada por meio de algoritmo genético. O conjunto de dados utilizado corresponde a telemetrias reais do subsistema de energia do satélite CBERS-4, totalizando mais de 4,3 milhões de amostras, das quais 56.081 foram utilizadas nos processos de treinamento, validação e teste. O desempenho foi medido pela Média Relativa do Erro Quadrático (MRSE), cujos resultados mostraram que a arquitetura intermediária apresentou o menor erro (0,4919%), superando a simples (0,5510%) e a complexa (0,6160%). Os achados indicam que arquiteturas excessivamente profundas não garantem melhor precisão, enquanto configurações extremamente simples podem perder robustez. A configuração intermediária destacou-se como a mais equilibrada, conciliando acurácia e viabilidade computacional em cenários de simulação em tempo quase real. Os resultados reforçam a relevância do uso de algoritmos de otimização na definição de arquiteturas e apontam caminhos para a aplicação de modelos mais adaptativos em diferentes subsistemas de satélites.

**Palavras-chave:** Redes neurais artificiais. Simuladores operacionais de satélites. Envelhecimento de baterias. Arquiteturas de RNA. Modelagem orientada a dados.

## INTRODUÇÃO

O controle em solo de satélites operacionais depende fortemente de simuladores capazes de reproduzir, com alta fidelidade, o comportamento do sistema em órbita. Esses simuladores são empregados para validar telecomandos e apoiar atividades de manutenção e operação, reduzindo riscos associados à execução de comandos em voo (Boden, 1998; ECSS, 2010; Hendricks; Eickhoff, 2005). Sua relevância é ainda maior em missões de longa duração, nas quais os equipamentos espaciais sofrem degradação progressiva.

Um aspecto crítico nessa área é a atualização dos modelos de simulação à medida que o satélite envelhece. A experiência do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) mostra que diversos satélites de médio e grande porte, como o CBERS-4, permanecem em funcionamento muito além da vida útil projetada, exibindo comportamentos distintos do período inicial de operação (Rodrigues, 2024). Essa condição exige modelos que acompanhem as mudanças do sistema, sobretudo no subsistema de energia, em que a degradação das baterias impacta diretamente a confiabilidade da missão (Magalhaes, 2009; Magalhães, 2012; Magalhaes; Pinheiro, 2017).

As metodologias tradicionais de modelagem matemática enfrentam dificuldades para representar tais alterações, principalmente pela complexidade de mensurar efeitos cumulativos do ambiente espacial sobre os equipamentos. Nesse cenário, técnicas baseadas em dados vêm ganhando espaço, com destaque para as Redes Neurais Artificiais (RNAs), que oferecem flexibilidade para capturar relações não lineares presentes nas telemetrias de bordo (Aleksander; Morton, 1993; Chow; Cho, 2007; Reis Junior et al., 2021). Aplicações recentes demonstram que RNAs podem atingir erros inferiores a 1% na representação do envelhecimento de baterias em simuladores, mantendo tempos de execução compatíveis com os requisitos de operação quase em tempo real (Rodrigues, 2024; Rodrigues *et al.*, 2021).

Neste artigo, investiga-se como a arquitetura da RNA afeta o desempenho da modelagem do envelhecimento em simuladores operacionais de satélites. Foram avaliadas três arquiteturas distintas: uma estrutura simples (6x1x1x1x1), uma versão mais complexa (6x10x10x10x1) e uma configuração intermediária (6x9x2x1) otimizada por algoritmo genético. A métrica de comparação adotada foi o MRSE (Média Relativa do Erro Quadrático). Os resultados obtidos indicam que a arquitetura intermediária apresentou o



melhor desempenho, revelando que a escolha da topologia da rede é decisiva e que modelos excessivamente complexos não garantem maior precisão.

A contribuição central deste trabalho é evidenciar a importância da definição adequada da arquitetura de RNAs para equilibrar acurácia e custo computacional, favorecendo o uso dessas técnicas em simuladores que precisam manter desempenho consistente ao longo de toda a vida útil do satélite.

## MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho foi organizada em três etapas principais: preparação dos dados, modelagem com redes neurais artificiais e validação dos resultados. O conjunto de dados utilizado é composto por telemetrias reais do subsistema de energia do satélite CBERS-4, com foco nas variáveis relacionadas à bateria 1. A variável de saída, a ser modelada, corresponde à tensão da bateria (VBAT1), escolhida por refletir diretamente o envelhecimento do subsistema.

As variáveis de entrada foram selecionadas a partir da análise física do fenômeno e da avaliação de correlações numéricas, conforme descrito em Rodrigues (2024). Foram consideradas: (i) a corrente da bateria (IBAT1), (ii) a corrente do barramento (IBUS), (iii) a corrente de entrada do regulador de descarga da bateria (IBDR1IN), (iv) a corrente de saída do regulador (IBDROUT), (v) a corrente do arranjo solar 1A (ISG1A) e (vi) a temperatura da bateria (TBAT1). Dessa forma, o modelo considera seis variáveis de entrada e uma de saída.

No pré-processamento, todas as variáveis foram normalizadas para a faixa  $[0,1]$ , de modo a garantir maior estabilidade durante o treinamento da rede neural. O conjunto de dados completo é composto por 4.319.678 amostras para cada variável, das quais 56.081 amostras foram selecionadas e divididas em três subconjuntos: treinamento, utilizado para o ajuste dos pesos sinápticos; validação, destinado a monitorar a evolução do erro e evitar sobreajuste; e teste, reservado exclusivamente para a aferição final do desempenho. O restante do conjunto de dados foi empregado posteriormente para a etapa de generalização, que corresponde ao processo posteriormente denominado de validação em contexto operacional.

A etapa de modelagem foi baseada em trabalhos anteriores (Rodrigues, 2024; Rodrigues *et al.*, 2021), que investigaram o uso de redes neurais artificiais (RNAs) na representação do envelhecimento de baterias em simuladores operacionais. O estudo de Rodrigues (2024) identificou, por meio de algoritmo genético, a arquitetura 6x9x2x1 como a mais adequada para o problema, composta por seis entradas, duas camadas ocultas com nove e dois neurônios, respectivamente, e uma saída. A partir dessa configuração de referência, este trabalho avaliou duas novas arquiteturas: uma mais simples, 6x1x1x1x1, formada por três camadas ocultas de um neurônio cada, e outra mais complexa, 6x10x10x10x1, composta por três camadas ocultas com dez neurônios cada. Todas as arquiteturas foram implementadas com funções de ativação log-sigmoide nas camadas ocultas e função linear na saída, e treinadas com o algoritmo de retropropagação do erro, ajustando-se empiricamente parâmetros como taxa de aprendizado e número de épocas.

A generalização do desempenho foi realizada utilizando a métrica Média Relativa do Erro Quadrático (MRSE), aplicada ao conjunto de dados que não foi utilizado durante o treinamento, conforme Equação 1.

$$MRSE(\%) = \frac{1}{n_o} \sum_{o=1}^{n_o} \left[ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i)^2}} \right] \quad (1)$$

Onde  $y_i$  representa a saída medida (telemetria de VBAT1);  $\hat{y}_i$  a saída simulada;  $n_o$  o número total de saídas, e  $N$  a quantidade de dados (amostras) utilizada para medir o desempenho do modelo. Essa métrica foi escolhida por expressar em termos percentuais a discrepância entre os valores simulados e os observados, permitindo a comparação direta entre as diferentes arquiteturas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do desempenho das três arquiteturas de redes neurais artificiais permitiu identificar o impacto direto da topologia sobre a acurácia da modelagem do envelhecimento da bateria. Os resultados, apresentados na Tabela 1, mostram os valores da Média Relativa do Erro Quadrático (MRSE) para cada configuração. A arquitetura 6x9x2x1, apresentada na Figura 1a, previamente identificada por Rodrigues (2024) como a melhor solução por meio



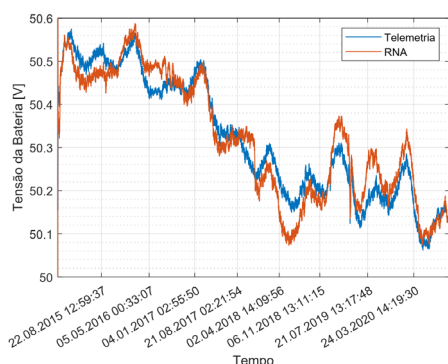
de algoritmo genético, apresentou MRSE de 0,4919%, confirmando seu bom equilíbrio entre acurácia e custo computacional. Já a arquitetura 6x1x1x1x1, considerada a mais simples, obteve MRSE de 0,5510%, um valor próximo ao da configuração de referência, mas com leve perda de precisão, como ilustrado na Figura 1b. Por outro lado, a arquitetura mais complexa, 6x10x10x10x1, alcançou MRSE de 0,6160%, demonstrando desempenho inferior às demais, conforme mostrado na Figura 1c.

Tabela 1 – Resumo dos resultados.

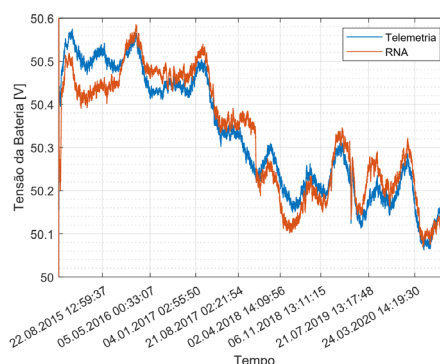
Arquitetura			MRSE (%)
Entrada	Camadas ocultas	Saída	
6	1x1x1	1	0,5510
6	9x2	1	0,4919
6	10x10x10	1	0,6160

Fonte: Elaborada pelos autores.

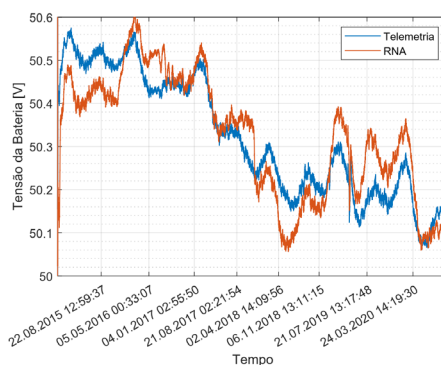
Figura 1 – Comparação entre as telemetrias reais e a saída da RNA.



Arquitetura 6x9x2x1.  
(a)



Arquitetura 6x1x1x1x1.  
(b)



Arquitetura 6x10x10x10x1.  
(c)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Esses resultados evidenciam que a complexidade adicional não implica necessariamente em maior acurácia. Pelo contrário, o aumento do número de parâmetros pode introduzir dificuldades de generalização e elevar o custo computacional sem ganhos efetivos de desempenho (Rodrigues, 2024; Tominaga, 2020).

Além da acurácia, a escolha da arquitetura deve considerar a viabilidade prática em simuladores operacionais de satélite, que impõem restrições de execução em tempo quase real. Nesse aspecto, a arquitetura simples (6x1x1x1x1) apresenta custo computacional reduzido, o que favoreceria sua implementação em cenários de recursos limitados. Contudo, sua perda de desempenho em relação à configuração intermediária indica que a simplificação extrema pode comprometer a fidelidade do modelo. Já a arquitetura complexa (6x10x10x10x1), apesar de explorar maior número de parâmetros e camadas, não apenas obteve o pior resultado de MRSE, como também demanda maior tempo de processamento, o que a torna inadequada para aplicações em simuladores operacionais. A arquitetura intermediária (6x9x2x1), por sua vez, demonstrou ser a solução mais equilibrada, conciliando precisão e custo computacional, além de confirmar a eficácia do processo de otimização baseado em algoritmo genético proposto em Rodrigues (2024). Dessa forma, os achados corroboram a literatura recente, que aponta que arquiteturas otimizadas e de complexidade moderada tendem a oferecer melhor desempenho prático do que modelos excessivamente simples ou complexos (Hasanpour *et al.*, 2016; Shah *et al.*, 2020).

## CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a influência da arquitetura de redes neurais artificiais no desempenho de modelos aplicados ao envelhecimento de satélites em simuladores operacionais, utilizando como métrica de comparação a Média Relativa do Erro Quadrático (MRSE). A análise foi realizada a partir de três arquiteturas distintas: uma simples (6x1x1x1x1), uma complexa (6x10x10x10x1) e a intermediária (6x9x2x1), previamente identificada em como solução otimizada por algoritmo genético.

Os resultados mostraram que a arquitetura intermediária obteve o menor erro (0,4919%), superando tanto a arquitetura simples (0,5510%) quanto a complexa (0,6160%). Esses resultados confirmam que arquiteturas excessivamente profundas não garantem maior

precisão e que modelos excessivamente reduzidos podem comprometer a robustez. A configuração intermediária destacou-se como a mais equilibrada, conciliando acurácia e viabilidade de execução em tempo quase real, requisito fundamental para simuladores operacionais de satélite.

A principal contribuição deste trabalho é evidenciar que a escolha adequada da arquitetura da rede neural é determinante para a confiabilidade de simuladores que acompanham o envelhecimento de satélites ao longo da operação. Como perspectivas futuras, sugere-se ampliar a análise para outros subsistemas além da bateria, investigar arquiteturas alternativas, como redes recorrentes ou redes profundas otimizadas por técnicas bayesianas, e avaliar de forma quantitativa o impacto do custo computacional em cenários de simulação em tempo real. Tais desdobramentos podem contribuir para o aprimoramento de modelos mais adaptativos e eficientes, alinhados às demandas crescentes das missões espaciais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) pelo apoio institucional e financeiro, por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) (92782/17/RPE, 92845/17/RPE, 94041/17/RPE) e Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/CNPq (Resolução Normativa RN-017/2006 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)).

## REFERÊNCIAS

ALEKSANDER, Igor; MORTON, Helen. **An introduction to neural computing**. Reprinted. London: Chapman & Hall, 1993.

BODEN, Daryl G. (Org.). **Cost-effective space mission operations**. 1. ed., rev.2. printing. New York: McGraw-Hill [u.a.], 1998(Space technology series).

CHOW, Tommy W. S.; CHO, Siu-Yeung. **Neural networks and computing: learning algorithms and applications**. London : Hackensack, NJ: Imperial College Press ; Distributed by World Scientific, 2007(Series in electrical and computer engineering, v. 7).

ECSS. **Space engineering: system modelling and simulation**. ESTEC, P.O. Box 299, 2200 AG Noordwijk - The Netherlands: [s. n.], abr. 2010. Disponível em: <https://ecss.nl/hbstms/ecss-e-tm-10-21a-system-modelling-and-simulation/>. Acesso em: 14 set. 2025.



HASANPOUR, Seyyed Hossein; ROUHANI, Mohammad; FAYYAZ, Mohsen; SABOKROU, Mohammad. Lets keep it simple, Using simple architectures to outperform deeper and more complex architectures. [s. l.], 2016. DOI 10.48550/ARXIV.1608.06037. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1608.06037>. Acesso em: 14 set. 2025.

HENDRICKS, Reinhard; EICKHOFF, Jens. The significant role of simulation in satellite development and verification. **Aerospace Science and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 273–283, abr. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.12.006>.

MAGALHÃES, Renato Oliveira de. **Estudo de avalanche térmica em um sistema de carga e descarga de bateria em satélites artificiais**. 2012. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP7W/3B7FP2H>.

MAGALHAES, Renato Oliveira de. Power conditioning and distribution unit of China-Brazil satellite CBERS3. *In*: 2009 BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (COBEP), set. 2009. **2009 Brazilian Power Electronics Conference [...]**. Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil: IEEE, set. 2009. p. 1104–1107. DOI 10.1109/COBEP.2009.5347676. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5347676/>. Acesso em: 14 set. 2025.

MAGALHAES, Renato Oliveira de; PINHEIRO, Diego da Silva. CBERS04A power supply simulation and power budget analysis. *In*: 2017 BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (COBEP), nov. 2017. **2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) [...]**. Juiz de Fora: IEEE, nov. 2017. p. 1–7. DOI 10.1109/COBEP.2017.8257310. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8257310/>. Acesso em: 14 set. 2025.

REIS JUNIOR, J. D.; AMBROSIO, A. M.; DE SOUSA, F. L.; SILVA, D. F. Spacecraft real-time thermal simulation using artificial neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 198, abr. 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02908-7>.

RODRIGUES, Italo Pinto. **Análise exploratória para modelagem do envelhecimento de baterias em um simulador operacional de satélites**. 2024. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2024. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/4BJDL3P?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR>.

RODRIGUES, Italo Pinto; OLIVEIRA, Priscylla A.S.; AMBROSIO, Ana Maria; CHAGAS, Ronan A.J. Modeling satellite battery aging for an operational satellite simulator. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 67, n. 6, p. 1981–1999, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.031>.

SHAH, Harshay; TAMULY, Kaustav; RAGHUNATHAN, Aditi; JAIN, Prateek; NETRAPALLI, Praneeth. The Pitfalls of Simplicity Bias in Neural Networks. [s. l.], 2020. DOI 10.48550/ARXIV.2006.07710. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2006.07710>. Acesso em: 14 set. 2025.

TOMINAGA, Jun. **Simulação de satélites com base em adaptação autônoma de modelos comportamentais**. 2020. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/4BJDL3P?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR>.