

Arquitetura de rede neural artificial otimizada para previsão da temperatura da bateria em simuladores operacionais de satélites

Italo Pinto Rodrigues¹; 0000-0002-6832-8358
Gabriel Alberto Rodrigues¹; 0009-0008-6651-7156
Thalisson Wendel da Silva Nascimento¹; 0009-0007-1191-7032
João Gabriel dos Santos Dias Moura Matos¹; 0009-0000-2270-6010
Bruno Lima dos Santos¹; 0009-0002-1808-2369

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

Resumo: A confiabilidade dos simuladores operacionais de satélites depende da capacidade de reproduzir o comportamento dos subsistemas ao longo de toda a vida útil da missão. Entretanto, um dos desafios recorrentes está na representação do envelhecimento dos equipamentos, em especial da bateria, cujo desempenho se degrada de forma complexa ao longo do tempo. Este trabalho investiga o uso de redes neurais artificiais otimizadas por algoritmos genéticos para modelar a temperatura da bateria do satélite CBERS-4. Foram utilizadas telemetrias reais coletadas entre 2015 e 2020, totalizando mais de quatro milhões de registros, reduzidos a um conjunto representativo para viabilizar a execução em tempo real. O processo de busca de arquiteturas de rede foi conduzido com base na minimização do erro médio relativo quadrático (MRSE), considerando até três camadas ocultas. Os resultados indicam a viabilidade de obter arquiteturas compactas e precisas, adequadas para integração em simuladores operacionais, conciliando simplicidade estrutural e fidelidade de previsão. Conclui-se que a abordagem proposta pode contribuir para aumentar a confiabilidade de simulações em missões estendidas, abrindo perspectivas para aplicação em outros subsistemas críticos.

Palavras-chave: Simuladores operacionais; Satélites; Rede neural artificial; Algoritmo genético; Bateria.

INTRODUÇÃO

A utilização de simuladores operacionais de satélites é fundamental para apoiar as equipes de controle durante a fase de operação em órbita. Esses simuladores permitem validar telecomandos, treinar operadores e antecipar situações críticas sem expor a missão a riscos reais (Boden, 1998; ECSS, 2010; Hendricks; Eickhoff, 2005). Para cumprir esse papel, os modelos que compõem o simulador devem reproduzir com alta fidelidade o comportamento dos subsistemas espaciais, incluindo telemetrias e telecomandos, de modo a garantir previsões confiáveis ao longo de toda a missão (Ambrosio *et al.*, 2006).

Apesar da importância estratégica, a literatura destaca lacunas relevantes. Tominaga (2020) observa que há escassez de descrições detalhadas sobre a implementação dos modelos de simulação, possivelmente em razão de seu valor comercial. Além disso, os simuladores tradicionalmente não incorporam mecanismos para acompanhar o envelhecimento dos equipamentos, mesmo quando a operação do satélite se estende além da vida útil prevista. Esse descompasso gera risco de divergência entre as telemetrias reais e os valores reproduzidos em solo, comprometendo diagnósticos e aumentando a probabilidade de falhas operacionais.

A bateria é um dos subsistemas que mais evidenciam esse problema. Responsável por garantir energia durante os períodos de eclipse, sua degradação compromete diretamente a disponibilidade de potência do satélite. Modelos convencionais, baseados em equações determinísticas, apresentam limitações para descrever de forma realista a evolução desse processo de envelhecimento (Magalhaes, 2009; Magalhães, 2012; Magalhaes; Pinheiro, 2017). No caso do satélite CBERS-4, já operando além da vida útil de projeto, o simulador SimCBERS exige modelos mais flexíveis e adaptados a telemetrias reais para manter sua confiabilidade (Rodrigues *et al.*, 2021).

A modelagem orientada a dados surge como alternativa para superar essas limitações. Técnicas de aprendizado de máquina, em especial as Redes Neurais Artificiais (RNAs), oferecem capacidade de representar fenômenos não lineares de forma precisa, desde que acompanhadas de estratégias para controlar a complexidade e garantir execução em tempo real (Tipaldi *et al.*, 2020). Nesse sentido, a otimização de arquiteturas de RNA por meio de algoritmos genéticos tem se mostrado promissora para conciliar simplicidade estrutural com alto desempenho (Cao *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, este trabalho investiga arquiteturas de RNA aplicadas à previsão da temperatura da bateria do satélite CBERS-4 em ambiente de simulação operacional. O objetivo é identificar uma configuração suficientemente simples para execução em tempo real, mas robusta para refletir o envelhecimento do subsistema e fornecer telemetrias compatíveis com aquelas observadas em órbita.

MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo consistem em telemetrias reais do subsistema de energia (EPSS) do satélite CBERS-4, coletadas entre janeiro de 2015 e setembro de 2020. O conjunto inicial continha 4.325.061 amostras de cada variável monitorada. Para a construção do modelo orientado a dados, foram selecionadas as variáveis mais diretamente relacionadas à previsão da temperatura da bateria, a saber: IBDR0UT, IBAT1, IBDR1IN, IBUS, ISG1A, ISAG1AT OBDR e VBAT1. Considerando essas sete variáveis de entrada, a base de dados utilizada apresentou 4.319.678 medições para cada uma delas.

Devido ao elevado volume de informações e à necessidade de viabilizar a execução em tempo real no simulador, foi realizada uma redução sistemática do conjunto de dados. Para tanto, manteve-se apenas 10% das amostras, respeitando a ordem cronológica em que foram obtidas, o que resultou em 56.081 registros para cada variável. Os dados não incluídos nesse recorte foram preservados para a etapa de validação do modelo, garantindo independência entre treinamento e teste.

O modelo desenvolvido segue a arquitetura de uma Rede Neural Artificial do tipo Perceptron Multicamadas (MLP), composta por sete neurônios de entrada, correspondentes às variáveis de telemetria selecionadas, e um neurônio de saída, representando a temperatura da bateria. Entre essas camadas foram consideradas até três camadas ocultas, cada uma com número de neurônios variando entre 0 e 10. A definição da configuração mais adequada foi conduzida por meio de um Algoritmo Genético (AG), no qual cada indivíduo da população representava uma arquitetura candidata. O AG tende a minimizar o valor da função objetivo expresso pela Equação 1, cuja penalidade encontrada é definida pela Equação 2. Além disso, a função objetivo se baseia nos erros MSE obtidos durante a fase de treinamento, conforme Equação 3.



$$f_1 = \text{penalidade} \left(\frac{\rho_1 * E_{\text{treinamento}} + \rho_2 * E_{\text{generalizacao}}}{\rho_1 + \rho_2} \right) \quad (1)$$

$$\text{penalidade} = (e^{5*10^{-8}*nw^2}) + (5 * 10^{-5} * \text{epocas} + 1) \quad (2)$$

$$E_{\text{treinamento,generalizacao}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

Onde, ρ_1 e ρ_2 ($\rho_1, \rho_2 > 0$; $\rho_1, \rho_2 \in \Re$) são parâmetros utilizados para ponderar a importância dos erros, $E_{\text{treinamento}}$ representa o erro de treinamento e $E_{\text{generalizacao}}$ o erro de generalização. Além disso, y_i representa a saída medida (telemetria de Temperatura de bateria); \hat{y}_i a saída simulada. Após a definição da arquitetura, encontrada pelo AG, o desempenho da rede é avaliado utilizando a média relativa do erro quadrático (MRSE (%)).

$$\text{MRSE} (\%) = \frac{1}{n_o} \sum_{o=1}^{n_o} \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i)^2}} \right] \quad (4)$$

Onde n_o é a quantidade de saídas da RNA.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

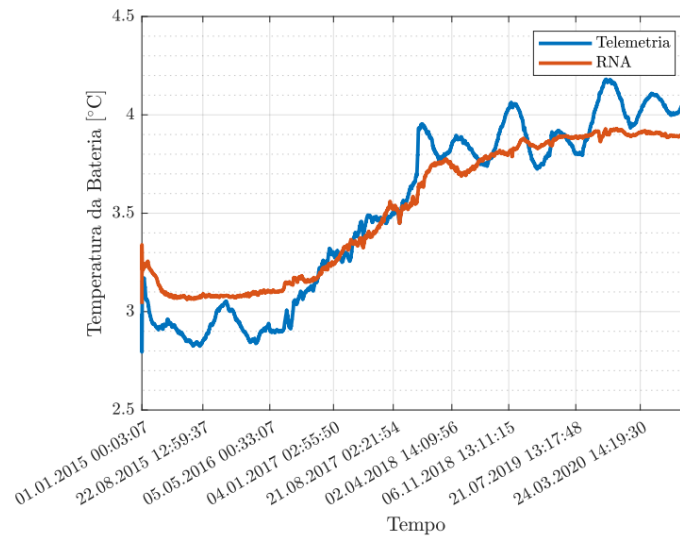
A aplicação do Algoritmo Genético para a busca da arquitetura mais adequada de Rede Neural Artificial resultou na seleção de uma rede configurada com sete neurônios de entrada, oito neurônios na primeira camada oculta, dois na segunda, nenhuma unidade na terceira e um neurônio de saída. Essa arquitetura, representada como 7x8x2x1, apresentou erro médio relativo quadrático (MRSE) de 7,5380%, valor considerado satisfatório para a previsão da temperatura da bateria em ambiente de simulação operacional.

O desempenho alcançado indica que é possível representar o comportamento térmico da bateria do CBERS-4 por meio de um modelo de baixa complexidade estrutural, mantendo ao mesmo tempo precisão adequada. Esse equilíbrio é fundamental para aplicações em simuladores operacionais, nos quais restrições de tempo real impõem limites ao número de cálculos que podem ser processados. Enquanto abordagens de maior fidelidade, como as baseadas em modelos matemáticos detalhados, tendem a ser computacionalmente onerosas (Magalhaes, 2009; Magalhães, 2012), a solução encontrada demonstra que



técnicas orientadas a dados podem superar essa barreira ao reduzir a complexidade do modelo sem perda expressiva de acurácia.

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



Fonte: Elaborada pelos autores.

Comparando-se com outros trabalhos da literatura, observa-se que RNAs têm sido amplamente utilizadas para representar fenômenos em sistemas espaciais. Estudos anteriores aplicaram essas técnicas à previsão de comportamento térmico, tensão de barramento e estado de carga de baterias (Ibrahim et al., 2019; Reis Junior et al., 2021; Song et al., 2018). No entanto, muitas dessas propostas não utilizaram telemetrias reais ou resultaram em arquiteturas mais complexas, dificultando sua aplicação direta em simuladores operacionais. Mais recentemente, Cao et al. (2023) propuseram o uso de otimização Bayesiana para encontrar arquiteturas de redes profundas, mas os modelos resultantes apresentaram elevado número de neurônios, aumentando significativamente o custo computacional.

Nesse cenário, a arquitetura obtida neste trabalho diferencia-se por atender simultaneamente às necessidades de fidelidade e simplicidade, conciliando precisão com viabilidade de execução em tempo real. Essa característica é particularmente relevante em simuladores como o SimCBERS, que reproduzem o comportamento do satélite como um todo e, portanto, dependem de modelos eficientes para não comprometer o desempenho global.

CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a utilização de Redes Neurais Artificiais otimizadas por Algoritmos Genéticos como alternativa para representar o envelhecimento da bateria do satélite CBERS-4 em simuladores operacionais. O objetivo foi identificar uma arquitetura suficientemente simples para execução em tempo real, mas capaz de reproduzir a evolução da temperatura da bateria de forma precisa.

A metodologia adotada possibilitou a seleção de uma arquitetura de RNA compacta e com desempenho satisfatório, demonstrando que modelos orientados a dados podem superar limitações de abordagens matemáticas tradicionais, frequentemente complexas e de alto custo computacional. Assim, os resultados obtidos reforçam a viabilidade de aplicar técnicas de aprendizado de máquina em simuladores de grande porte, como o SimCBERS, garantindo maior confiabilidade na representação do comportamento do satélite ao longo de sua vida útil.

Embora os resultados sejam promissores, o estudo apresenta limitações, como a restrição ao uso de uma única métrica de avaliação e a concentração na modelagem de apenas um subsistema. Trabalhos futuros podem explorar a aplicação da mesma abordagem a outros componentes críticos, como geradores solares e reguladores de potência, bem como investigar técnicas de hibridização entre algoritmos genéticos e outros métodos de otimização. Além disso, a integração de diferentes métricas de desempenho pode contribuir para uma avaliação mais abrangente da qualidade dos modelos.

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.

AMBROSIO, Ana Maria; CARDOSO, Paulo Eduardo; ORLANDO, Valcir; NETO, José Bianchi. Brazilian Satellite Simulators: Previous Solutions Trade-off and New Perspectives for the CBERS Program. *In: 8TH CONFERENCE ON SPACE OPERATIONS, 2006. Proceedings of the 8th Conference on Space Operations [...]*. Rome, Italy: AIAA, 2006. . Acesso em: 14 set. 2025.

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

CAO, Mengda; ZHANG, Tao; LIU, Yajie; WANG, Yu; SHI, Zhichao. A Bayesian optimization hyperband-optimized incremental deep belief network for online battery behaviour modelling for a satellite simulator. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 58, p. 106348, fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106348>.

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-se-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.

TIPALDI, Massimo; FERUGLIO, Lorenzo; DENIS, Pierre; D'ANGELO, Gianni. On applying AI-driven flight data analysis for operational spacecraft model-based diagnostics. **Annual Reviews in Control**, [s. l.], v. 49, p. 197–211, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.04.012>.

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/8JMKD3MGP3W34R/42SQ8J8>.