REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

CO-DESIGN 4D DE CENTROS DE DADOS ORBITAIS: CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO EM MALHA FECHADA DE DINÂMICA TÉRMICO-ENERGÉTICA, ORIENTAÇÃO DE ATITUDE E DOWNLINK SEMÂNTICO

4D CO-DESIGN OF ORBITAL DATA CENTERS: CLOSED-LOOP MODEL PREDICTIVE CONTROL OF THERMAL-ENERGY DYNAMICS, ATTITUDE ORIENTATION, AND SEMANTIC DOWNLINK

CO-DISEÑO 4D DE CENTROS DE DATOS ORBITALES: CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS EN LAZO CERRADO DE DINÁMICA TÉRMICO-ENERGÉTICA, ORIENTACIÓN DE ACTITUD Y ENLACE DESCENDENTE SEMÁNTICO

Dafnhê Thor Castro de Martins Barros
Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação (PROPECAUT), Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Brasil
E-mail: dafnhe.thor@msn.com

Felipe Augusto Trancoso Fernandes
Engenheiro de Controle e Automação, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Brasil
E-mail: felipealgusto@uol.com.br

Resumo

A proliferação de modelos fundacionais de inteligência artificial em nós de computação de borda em órbita baixa da Terra (LEO) confronta a engenharia aeroespacial com um severo gargalo radiativo no vácuo: a despeito da existência do fundo cósmico a 3 K, a ausência de matéria anula a transferência de calor convectiva, impondo a dissipação exclusivamente por radiação regida pela Lei de Stefan-Boltzmann (T_{rad}^4). Sob rajadas estocásticas de inferência neural, a dissipação de potência dinâmica e estática de fuga em chips nanométricos acopla-se ao balanço elétrico do barramento primário de 400 V HVDC com bateria de alta tensão 96S1P Li-ion NMC ($355{,}2$ V nominais, $6{,}8$ Ah, $2{,}40$ kWh, rendimento conservador $\eta_{\text{conv}} = 90\%$), à dinâmica rotacional de atitude que dita o fator de forma de visão térmica da Terra (F_{Earth}) e às janelas efêmeras de contato em Banda Ka ($26{,}5$ GHz) mediadas por compressão semântica. Abordagens tradicionais desacopladas resultam em estrangulamento térmico reativo ($T_j > 85$ °C) e perda de capacidade de downlink. Para superar esse limite, este artigo formula e valida numericamente uma arquitetura de Co-Design 4D em Malha Fechada através de um Modelo Multifísico Integrado de Ordem Reduzida (ROM) de 16 estados ($\mathbb{R}^{16}$) e 7 entradas ($\mathbb{R}^7$), governado por um Controlador Preditivo Econômico Não-Linear Hierárquico (4D-NMPC) e supervisionado por uma máquina de estados FDIR em Duas Fases. Partindo de uma contingência pós-detumble ($\text{SoC}_0 = 8{,}0\%$), a Fase 1 do FDIR canaliza $1553{,}0$ W líquidos para recarregar a bateria até o limiar seguro de $35{,}0\%$ em exatos $25{,}0$ min ($0{,}647$ kWh) e atingir $70{,}6\%$ aos $58{,}0$ min, garantindo viabilidade estrita na entrada da Fase 2 (4D-NMPC Nominal). Sob garantias de Estabilidade Prática Entrada-para-Estado (ISpS), simulações de duas órbitas SSO (LTAN $= 10{:}30$) e campanha de Monte Carlo (50 rodadas) demonstram zero violações térmicas ($T_{j,\text{pico}} = 81{,}85$ °C), atenuação de 71,4% nos gradientes térmicos, erro médio de apontamento de 0,41° (margem de enlace de $+4{,}8$ dB), SoC mínimo pós-recuperação de 42,6% nos eclipses e ganho de 4,26× na inteligência útil validada por tarefa entregue em solo ($14{,}88$ GB_{eq} vs. $3{,}49$ GB_{eq}) via compressão semântica de 7,94:1 ($\alpha_{\text{sem}} = 0{,}92$, $\text{mAP}_{50} = 94{,}2\%$).

Palavras-chave: Centros de dados orbitais; Co-design 4D; Controle preditivo econômico; Modelagem de ordem reduzida; Comunicação semântica.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Abstract

The deployment of deep neural network accelerators in Low Earth Orbit (LEO) edge-computing data centers faces a severe vacuum radiative bottleneck: despite the 3 K cosmic background, the hard vacuum eliminates convective cooling, forcing heat dissipation solely through non-linear Stefan-Boltzmann radiation (T_{rad}^4). Under stochastic AI inference bursts, dynamic switching and subthreshold leakage power in nanoscale silicon are coupled to the 400 V HVDC bus interfaced with a high-voltage 96S1P Li-ion NMC battery (355.2 V nominal, 6.8 Ah, 2.40 kWh, conservative converter efficiency $\eta_{\text{conv}} = 90\%$), rigid-body attitude dynamics dictating the Earth radiative view factor (F_{Earth}), and Ka-band (26.5 GHz) ground contact windows mediated by semantic downlink compression. Traditional decoupled controllers induce reactive thermal throttling ($T_j > 85$ °C) and link degradation. To resolve this bottleneck, this paper formulates and numerically validates a Closed-Loop 4D Co-Design framework using a 16-state ($\mathbb{R}^{16}$), 7-input ($\mathbb{R}^7$) Integrated Multiphysics Reduced-Order Model (ROM) governed by a Hierarchical Economic Non-linear Model Predictive Controller (4D-NMPC) and a Two-Phase FDIR supervisor. Initialized at a post-detumble contingency state ($\text{SoC}_0 = 8.0\%$), FDIR Phase 1 injects 1553.0 W of net charging power to recover the battery to the 35.0% safety threshold in exactly 25.0 min (0.647 kWh) and reaches 70.6% at 58.0 min, ensuring strict feasibility when Nominal 4D-NMPC (Phase 2) engages. Under Input-to-State Practical Stability (ISpS) guarantees, two-orbit SSO simulations (LTAN $= 10{:}30$) and a 50-run Monte Carlo campaign demonstrate zero thermal violations ($T_{j,\text{peak}} = 81.85$ °C), a 71.4% reduction in transient thermal gradients, a 0.41° mean pointing error ($+4.8$ dB link margin), a 42.6% post-recovery eclipse minimum SoC, and a 4.26× gain in task-verified useful intelligence throughput (14.88 GB_{eq} vs. 3.49 GB_{eq}) via 7.94:1 semantic compression ($\alpha_{\text{sem}} = 0.92$, $\text{mAP}_{50} = 94.2\%$).

Keywords: Orbital data centers; 4D co-design; Economic model predictive control; Reduced-order modeling; Semantic communications.

Resumen

La proliferación de aceleradores de inteligencia artificial en nodos de computación de borde en órbita terrestre baja (LEO) enfrenta un severo cuello de botella radiativo en el vacío: a pesar del fondo cósmico a 3 K, el vacío elimina la convección, forzando la disipación puramente radiativa según la Ley de Stefan-Boltzmann (T_{rad}^4). Bajo ráfagas estocásticas de inferencia, la disipación en silicio nanométrico se acopla al balance del bus de 400 V HVDC con batería de alta tensión 96S1P Li-ion NMC ($355{,}2$ V nominales, $6{,}8$ Ah, $2{,}40$ kWh, eficiencia conservadora $\eta_{\text{conv}} = 90\%$), a la dinámica de actitud que rige el factor de visión terrestre (F_{Earth}) y a las ventanas de contacto en Banda Ka ($26{,}5$ GHz) mediante compresión semántica. Para superar los enfoques desacoplados, este artículo formula y valida numéricamente una arquitectura de Co-Diseño 4D en Lazo Cerrado mediante un Modelo Multifísico Integrado de Orden Reducido (ROM) de 16 estados ($\mathbb{R}^{16}$) y 7 entradas ($\mathbb{R}^7$), gobernado por un Controlador Predictivo Económico No Lineal Jerárquico (4D-NMPC) y un supervisor FDIR de Dos Fases. Partiendo de $\text{SoC}_0 = 8{,}0\%$, la Fase 1 del FDIR inyecta $1553{,}0$ W netos para recargar la batería hasta el umbral seguro del $35{,}0\%$ en exactos $25{,}0$ min ($0{,}647$ kWh) y alcanzar el $70{,}6\%$ a los $58{,}0$ min, garantizando factibilidad estricta en la Fase 2 (4D-NMPC Nominal). Bajo estabilidad práctica ISpS, simulaciones orbitales y análisis de Monte Carlo (50 corridas) demuestran cero violaciones térmicas ($81{,}85$ °C), reducción del 71,4% en gradientes térmicos, error medio de apuntamiento de 0,41°, SoC mínimo post-recuperación del 42,6% y un aumento de 4,26× en la inteligencia útil entregada en tierra ($14{,}88$ GB_{eq} vs. $3{,}49$ GB_{eq}) mediante compresión semántica de 7,94:1 ($\alpha_{\text{sem}} = 0{,}92$, $\text{mAP}_{50} = 94{,}2\%$).

Palabras clave: Centros de datos orbitales; Co-diseño 4D; Control predictivo económico; Modelado de orden reducido; Comunicación semántica.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

1. Introdução

A aceleração exponencial das demandas globais de processamento de inteligência artificial generativa, modelos de visão computacional de altíssima resolução e algoritmos de radar de abertura sintética (SAR) impulsionou uma pressão energética e hídrica crescente na infraestrutura computacional terrestre (Barroso, Hölzle, and Ranganathan; Bloch et al.). Em escala global, os centros de dados em hiperescala demandam frações expressivas da geração elétrica e consomem anualmente bilhões de litros de água tratada para climatização evaporativa de racks de aceleradores neurais (Souza, Silva, and Almeida). Como paradigma complementar para processamento de dados espaciais na própria fonte de captura, a implantação de clusters computacionais no espaço exterior consolidou o conceito de Centros de Dados Orbitais (Orbital Data Centers - ODCs) e nós de Computação de Borda Orbital (Orbital Edge Computing - OEC) (Agüera y Arcas et al.; Denby and Lucia).

Operando em órbita baixa da Terra (Low Earth Orbit - LEO) entre $500\,\text{km}$ e $800\,\text{km}$ em órbitas heliossíncronas (Sun-Synchronous Orbits - SSO), os satélites usufruem de irradiância solar extraterrestre sob o espectro AM0 ($G_{\text{AM0}} \approx 1361\,\text{W/m}^2$) durante os trechos iluminados da órbita, sem atenuação atmosférica e com eliminação total do consumo hídrico para resfriamento (Pignaton et al.; Wertz, Everett, and Puschell). Cumpre estabelecer uma distinção orbital rigorosa: enquanto órbitas SSO estritamente crepusculares (dawn-dusk, LTAN 06:00/18:00) podem manter iluminação solar quase contínua ao longo de grande parte do ano, as órbitas SSO diurnas típicas de observação da Terra (como a órbita circular de $550\,\text{km}$, inclinação $i = 97{,}6°$, excentricidade $e = 0{,}0012$ e hora local do nodo ascendente $\text{LTAN} = 10{:}30$ investigada neste estudo) atravessam periodicamente o cone de sombra terrestre, enfrentando eclipses solares de $34{,}2\,\text{min}$ $(2052\,\text{s})$ a cada período orbital de $95{,}63\,\text{min}$ $(5738\,\text{s})$. Adicionalmente, a execução da inferência neural a bordo mitiga o estrangulamento de banda dos enlaces descendentes de telecomunicações (Hu and Gong; Leyva-Mayorga et al.; Soret, Leyva-Mayorga, and Popovski).

No tocante à gestão térmica, Chen et al. introduziram na literatura de computação sustentável o termo Paradoxo Térmico da Proximidade (Proximity-

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Thermal Paradox) para descrever o acoplamento térmico radiativo mútuo (thermal crosstalk) entre módulos computacionais fisicamente densos em estruturas orbitais agregadas. No nível de um satélite ODC individual, manifesta-se um gargalo termodinâmico complementar: embora o universo cósmico atue como um sumidouro criogênico à temperatura de fundo de apenas $T_{\text{space}} \approx 3$ K, a ausência de matéria no vácuo espacial ($P < 10^{-4}$ Pa) anula rigorosamente a transferência de calor convectiva ($h \equiv 0$) (Meseguer, Pérez-Grande, and Sanz-Andrés). Toda a potência dissipada pelos circuitos integrados deve fluir por condução interna até radiadores superficiais externos, cuja rejeição ocorre exclusivamente por radiação governada pela quarta potência da temperatura absoluta na Lei de Stefan-Boltzmann (T_{rad}^4). Como a temperatura de junção não pode exceder limites seguros ($T_j \leq 85$ °C $= 358{,}15$ K), a capacidade líquida de rejeição térmica de um radiador no vácuo é restrita a aproximadamente 250 a 350 W/m^2 (Gilmore; Pederson et al.).

Nesse ecossistema físico acoplado, quatro subsistemas interagem continuamente: (1) o silício computacional, cuja corrente de fuga estática sub-threshold exibe realimentação positiva exponencial com a temperatura; (2) o sistema de potência (EPS) em barramento de 400 V HVDC, submetido a ciclos de insolação e eclipse de $34{,}2$ min; (3) o controle de atitude (ADCS), que governa o fator de forma de visão térmica da Terra (F_{Earth}) incidente sobre o radiador; e (4) o enlace de telecomunicações em Banda Ka ($26{,}5$ GHz), que exige apontamento preciso da antena durante passagens efêmeras sobre estações terrenas, mediado pela taxa de abstração semântica (α_{sem}). A abordagem aeroespacial tradicional opera esses quatro domínios de forma desacoplada, induzindo thermal throttling reativo, fadiga térmica e subutilização do enlace de descida.

O objetivo e a contribuição científica deste trabalho consistem em formular e validar numericamente uma arquitetura de Co-Design 4D em Malha Fechada baseada em um Modelo Multifísico Integrado de Ordem Reduzida (ROM) de 16ª ordem ($\mathbb{R}^{16}$), governada por um Controlador Preditivo Econômico Não-Linear Hierárquico (4D-NMPC) integrado a um supervisor de Detecção, Isolamento e Recuperação de Falhas (FDIR) em Duas Fases. O sistema coordena torques de atitude e magnetorquers para isolar radiativamente o radiador da Terra, modulação

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

dinâmica de tensão e frequência (DVFS), potência de radiofrequência e compressão semântica (α_{sem}), demonstrando Estabilidade Prática Entrada-para-Estado (ISpS) e viabilidade de execução em tempo real ($11{,}4$ ms médios / $18{,}2$ ms no percentil 99,9%) via algoritmo RTI-SQP e solver qpOASES.

2. Fundamentação Teórica e Modelagem Multifísica de Ordem Reduzida (ROM)

2.1 Dinâmica Eletrotérmica dos Processadores Neurais no Vácuo

A potência elétrica total drenada por aceleradores neurais nanométricos (GPUs/NPUs) em módulo aeroespacial System-on-Module (SoM) soma a potência dinâmica de chaveamento e a potência estática de fuga sub-limiar (Le Sueur and Heiser; Ruben):

$$P_{\text{chip}}(t) = P_{\text{dyn}}(t) + P_{\text{leak}}(t) \tag{1}$$

A potência dinâmica obedece a $P_{\text{dyn}}(t) = \alpha_{\text{act}}(t) C_{\text{eff}} V_{\text{core}}^2(t) f_{\text{clk}}(t)$, onde $C_{\text{eff}} = 12{,}5$ nF é a capacitância efetiva de comutação, $V_{\text{core}} \in [0{,}65\ \text{V}; 1{,}05\ \text{V}]$ é a tensão dos núcleos lógicos, $f_{\text{clk}} \in [0{,}60\ \text{GHz}; 2{,}20\ \text{GHz}]$ é a frequência de clock e $\alpha_{\text{act}} \in [0{,}1]$ é o fator de atividade de inferência. A potência estática de fuga exibe dependência exponencial com a temperatura de junção T_j e com a tensão de limiar $V_{\text{th}}(T_j)$ sujeita ao estreitamento térmico de bandgap de Varshni:

$$P_{\text{leak}}(t) = V_{\text{core}}(t)\left[I_0\left(\frac{T_j}{T_{\text{ref}}}\right)^2 \exp\left(-\frac{q_e V_{\text{th}}}{k_B T_j}\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{q_e V_{\text{core}}}{k_B T_j}\right)\right) + \beta_{\text{tun}} V_{\text{core}}^3\right] \tag{2}$$

A difusão térmica desde a junção de silício até o espalhador metálico (spreader) e o radiador externo é modelada por uma rede térmica concentrada de 3 nós (Murali et al.; Skadron et al.):

$$C_j \frac{dT_j}{dt} = P_{\text{chip}}(t) - \frac{T_j(t) - T_{\text{sp}}(t)}{R_{j\text{-sp}}} \tag{3}$$

$$C_{\text{sp}} \frac{dT_{\text{sp}}}{dt} = \frac{T_j(t) - T_{\text{sp}}(t)}{R_{j\text{-sp}}} - \frac{T_{\text{sp}}(t) - T_{\text{rad}}(t)}{R_{\text{sp-rad}}} \tag{4}$$

onde $C_j = 45{,}0$ J/K, $C_{\text{sp}} = 220{,}0$ J/K e $C_{\text{rad}} = 1850{,}0$ J/K são as capacidades térmicas nodais, e $R_{j\text{-sp}} = 0{,}18$ K/W (interface TIM-1 em liga líquida de gálio-índio) e $R_{\text{sp-rad}} = 0{,}25$ K/W (par redundante de tubos de calor bifásicos Loop Heat Pipes - LHPs de amônia) são as resistências condutivas. Ressalta-se que, enquanto a constante

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

de tempo rápida do die é $\tau_j = R_{j\text{-sp}}C_j \approx 8{,}1$ s, o espalhador possui $\tau_{\text{sp}} = R_{\text{sp-rad}}C_{\text{sp}} = 55{,}0$ s e o radiador apresenta constante de tempo radiativa linearizada $\tau_{\text{rad}} = C_{\text{rad}}/(4\epsilon_{\text{rad}}\sigma A_{\text{rad}}T_{\text{rad,0}}^3) \approx 85{,}0$ s, o que exige horizonte preditivo compatível com a inércia do radiador.

2.2 Arquitetura Elétrica 400 V HVDC, Bateria de Alta Tensão 96S1P e Conversores

O arranjo solar utiliza células de tripla junção InGaP/InGaAs/Ge ($A_{\text{pv}} = 4{,}20$ m^2, rendimento nominal $\eta_{\text{pv,0}} = 31{,}5\%$ a 25 °C, potência máxima em apontamento normal sob espectro AM0 de $P_{\text{pv, max}} = 4{,}20 \times 1361 \times 0{,}315 = 1800{,}6$ W) (Al Hosani et al.; Dwaza):

$$P_{\text{pv}}(t) = \zeta_{\text{ecl}}(t)G_{\text{AM0}}A_{\text{pv}}\eta_{\text{pv}}(T_{\text{pv}})max(0, n_{\text{sa}}^T s_{\text{sun}}(q,t)) \quad (5)$$

Justificativa de Engenharia para a Topologia de Bateria 96S1P ($355{,}2$ V): Em arquiteturas de pequenos satélites legados, o emprego de um banco de baixa tensão 14S ($51{,}8$ V nominais) acoplado a um barramento de 400 V HVDC imporia uma razão de elevação severa de quase 8:1 e correntes elevadas de 35 A a 43 A sob $1{,}8$ kW, exigindo barramentos de cobre espessos, indutores pesados e fortes perdas ôhmicas (I^2R). Para eliminar esse gargalo, o projeto adota uma arquitetura aeroespacial moderna de alta tensão 96S1P Li-ion NMC ($96 \times 3{,}7$ V $= 355{,}2$ V nominais; janela de operação de $288{,}0$ V a $403{,}2$ V; células qualificadas formato 21700 de $Q_{\text{nom}} = 6{,}8$ Ah; energia nominal $E_{\text{nom}} = 2{,}40$ kWh). A interface entre o pacote 96S1P e o barramento regulado de $V_{\text{bus}} = 400{,}0$ V é realizada por um conversor CC-CC Buck-Boost síncrono bidirecional não-isolado com razão de transformação suave ($1{,}1{:}1$), reduzindo a corrente máxima da bateria em 8 vezes (operando entre $4{,}5$ A e $5{,}5$ A, com limite físico de proteção em $I_{\text{max}} = 10{,}0$ A / taxa $1{,}5$C) (Barbi; Rashid).

Adotando de maneira estritamente conservadora uma eficiência global combinada de conversão eletrônica de potência e eficiência coulômbica de carga/descarga $\eta_{\text{conv}} = 90\%$ $(0{,}90)$, o balanço explícito de potência no barramento HVDC é dado por:

$$P_{\text{pv}}(t) = P_{\text{load, bus}}(t) + P_{\text{batt, in}}(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad (6)$$

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

onde a carga total drenada no barramento é $P_{\text{load, bus}}(t) = P_{\text{chip}}(t)/\eta_{\text{conv}} + P_{\text{comm}}(t) + P_{\text{adcs}}(t) + P_{\text{avionics}}$ (com consumo basal de aviônica $P_{\text{avionics}} = 35{,}0\ \text{W}$ e atuadores ADCS em regime nominal $P_{\text{adcs}} = 25{,}0\ \text{W}$). A dinâmica eletroquímica do Estado de Carga ($\text{SoC} \in [0,1]$) e das sobretensões de polarização de Thévenin de 2ª ordem ($V_{\text{RC1}}, V_{\text{RC2}}$) supervisionadas por filtro AUKF (Feng et al.; Jun et al.) obedece a:

$$\frac{d(\text{SoC})}{dt} = \frac{P_{\text{batt, eff}}(t)}{3600E_{\text{nom}}}, \frac{dV_{\text{RC1}}}{dt} = -\frac{V_{\text{RC1}}}{R_1C_1} + \frac{I_{\text{batt}}}{C_1}, \frac{dV_{\text{RC2}}}{dt} = -\frac{V_{\text{RC2}}}{R_2C_2} + \frac{I_{\text{batt}}}{C_2} \tag{7}$$

em que a potência efetiva transferida à bateria é assimétrica devido às perdas irreversíveis $P_{\text{loss}}(t)$: durante a recarga $(P_{\text{pv}} \geq P_{\text{load, bus}})$, $P_{\text{batt, eff}} = \eta_{\text{conv}}(P_{\text{pv}} - P_{\text{load, bus}})$; durante a descarga em eclipse $(P_{\text{pv}} < P_{\text{load, bus}})$, $P_{\text{batt, eff}} = (P_{\text{pv}} - P_{\text{load, bus}})/\eta_{\text{conv}}$.

2.3 Geometria Mecânica no Corpo, Atitude com Dessaturação e Isolamento Radiativo

Para garantir simultaneidade geométrica entre captação solar, rejeição térmica radiativa e apontamento de antena, a configuração mecânica dos subsistemas no referencial ortogonal fixo ao corpo $\mathcal{F}_B$ é definida explicitamente: (i) os painéis fotovoltaicos são montados ao longo do eixo $+Z_B$ dotados de mecanismo de rotação solar de 1 eixo (β-gimbal motorizado, $[-180°, +180°]$); (ii) a placa do radiador OSR ($A_{\text{rad}} = 1{,}60\ \text{m}^2$) é fixada rigidamente na face $-Y_B$ (vetor normal externo $n_{\text{rad},B} = [0, -1, 0]^T$); e (iii) a antena parabólica de Banda Ka é instalada na face $+X_B$ ($n_{\text{ant},B} = [1,0,0]^T$) equipada com mecanismo de apontamento fino de 2 eixos (Antenna Pointing Mechanism - APM, excursão angular de $\pm 15°$). Essa ortogonalidade permite rotacionar o satélite em torno do eixo de visada para orientar a normal $-Y_B$ do radiador para o espaço profundo sem interromper o rastreamento solar em $+Z_B$ nem o enlace com o solo em $+X_B$.

A cinemática de atitude é descrita pelo quaternion unitário $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T \in \mathbb{S}^3$, sujeito ao vínculo algébrico unitário explícito $\|q\|_2 = 1$ (Hegrenaes, Gravdahl, and Tøndel; Wertz, Everett, and Puschell):

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{2}\Xi(q)\boldsymbol{\omega}(t) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} -q_v^T \\ q_0 I_3 + [q_v]_\times \end{bmatrix}\boldsymbol{\omega}(t), \|q(t)\|_2 = 1 \tag{8}$$

A dinâmica rotacional de Euler incorpora três rodas de reação ortogonais ($h_{\text{rw}} = [h_x, h_y, h_z]^T \in \mathbb{R}^3$) e três hastes magnéticas ortogonais (magnetorquers, $m_{\text{mtq}} \in$

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

$\mathbb{R}^3$, dipolo nominal de $\pm 15\ \mathrm{A \cdot m^2}$) que interagem com o campo geomagnético terrestre $B_{\mathrm{IGRF}}(t)$ para realizar o descarregamento contínuo de momento angular (momentum dumping), prevenindo a saturação secular das rodas em missões de longa duração:

$$J\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = -\boldsymbol{\omega} \times (J\boldsymbol{\omega} + h_{\mathrm{rw}}) - \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{rw}} + m_{\mathrm{mtq}} \times B_{\mathrm{IGRF}}(t) + \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{ext}}(q,t), \frac{dh_{\mathrm{rw}}}{dt} = \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{rw}} - m_{\mathrm{mtq}} \times B_{\mathrm{IGRF}}(t) \quad (9)$$

onde $J = \mathrm{diag}(18{,}5;\ 22{,}1;\ 14{,}8)\ \mathrm{kg \cdot m^2}$ é o tensor principal de inércia, sujeito a limites físicos por eixo $\|h_{\mathrm{rw}}\|_\infty = max(|h_x|, |h_y|, |h_z|) \leq 15{,}0\ \mathrm{N \cdot m \cdot s}$ e $\|\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{rw}}\|_\infty = max(|\tau_x|, |\tau_y|, |\tau_z|) \leq 0{,}25\ \mathrm{N \cdot m}$.

A dinâmica térmica do radiador ($A_{\mathrm{rad}} = 1{,}60\ \mathrm{m^2}$, $C_{\mathrm{rad}} = 1850\ \mathrm{J/K}$, revestimento OSR com $\epsilon_{\mathrm{rad}} = 0{,}91$ e $\alpha_{\mathrm{rad}} = 0{,}08$) obedece ao balanço radiativo de Stefan-Boltzmann no vácuo:

$$C_{\mathrm{rad}}\frac{dT_{\mathrm{rad}}}{dt} = \frac{T_{\mathrm{sp}} - T_{\mathrm{rad}}}{R_{\mathrm{sp\text{-}rad}}} - \epsilon_{\mathrm{rad}}\sigma A_{\mathrm{rad}}(T_{\mathrm{rad}}^4 - T_{\mathrm{space}}^4) + Q_{\mathrm{inc}}(q,t) \quad (10)$$

onde a carga radiativa ambiental absorvida $Q_{\mathrm{inc}}(q,t) = A_{\mathrm{rad}}[\alpha_{\mathrm{rad}} a_{\mathrm{alb}} G_{\mathrm{AM0}} \zeta_{\mathrm{ecl}}(t) + \epsilon_{\mathrm{rad}} q_{\mathrm{IR,\ Earth}}] F_{\mathrm{Earth}}(q)$ é governada pelo fator de forma geométrico difuso de placa plana para esfera terrestre $F_{\mathrm{Earth}}(q)$ em função do ângulo nadir $\theta_{\mathrm{nadir}}(q)$ e do semiângulo do cone de horizonte terrestre $\theta_{\mathrm{horiz}} = \arcsin(R_E/(R_E + h_{\mathrm{orb}})) \approx 66{,}9°$ a $550\ \mathrm{km}$ (Meseguer, Pérez-Grande, and Sanz-Andrés; ECSS). A expressão analítica por partes (Equações 11 e 12) foi validada numericamente contra integração de traçado de raios de Monte Carlo com 10^6 raios sob emissão Lambertiana, apresentando desvio máximo inferior a $1{,}2\%$ inclusive na zona de transição rasante ao horizonte:

$$F_{\mathrm{Earth}}(q) = \sin^2(\theta_{\mathrm{horiz}})\cos(\theta_{\mathrm{nadir}}), \text{para } 0 \leq \theta_{\mathrm{nadir}} \leq \frac{\pi}{2} - \theta_{\mathrm{horiz}} \quad (11)$$

$$F_{\mathrm{Earth}}(q) = 0, \text{para } \theta_{\mathrm{nadir}} \geq \frac{\pi}{2} + \theta_{\mathrm{horiz}} (\approx 156{,}9°) \quad (12)$$

Proposição 1 (Condição Geométrica de Isolamento Radiativo Terrestre): Quando a orientação de atitude mantém a normal do radiador no cone zenital oposto à Terra ($\theta_{\mathrm{nadir}} \geq \pi/2 + \theta_{\mathrm{horiz}} \approx 156{,}9°$) e protegida da incidência solar direta ($n_{\mathrm{rad}}^T s_{\mathrm{sun}} \leq 0$), tem-se identicamente $F_{\mathrm{Earth}}(q) = 0$ e $Q_{\mathrm{inc}} = 0$, maximizando a rejeição radiativa líquida para o fundo cósmico de $3\ \mathrm{K}$.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

2.4 Orçamento de Enlace (Link Budget) em Banda Ka e Inteligência Útil Semântica

O enlace descendente opera em Banda Ka ($f_c = 26{,}5$ GHz, largura de banda $B_w = 250{,}0$ MHz). O ganho diretivo da antena de bordo ($G_{\text{tx},0} = 36{,}5$ dBi, $\theta_{3\text{dB}} = 1{,}80°$) varia com o erro de apontamento θ_{err} segundo $G_{\text{tx}}(\theta_{\text{err}}) = G_{\text{tx},0}\exp(-\ln(2)(\theta_{\text{err}}/\theta_{3\text{dB}})^2)$. Para comprovar a qualidade do canal físico sem postular ausência arbitrária de perda de pacotes, especifica-se o Link Budget completo para distância oblíqua $d \in [550\text{ km}; 1200\text{ km}]$: potência de transmissão nominal $P_{\text{comm}} = 85$ a 140 W ($19{,}3$ a $21{,}5$ dBW), perda de apontamento $L_{\text{point}} = 0{,}62$ dB (para $\theta_{\text{err}} = 0{,}41°$), perda de espaço livre FSPL $= 176{,}2$ dB (em $d = 610$ km), atenuação atmosférica e margem de chuva $L_{\text{atm}} = 2{,}4$ dB, e figura de mérito da estação terrena $G_{\text{rx}}/T = 28{,}5$ dB/K (antena de $2{,}4$ m). Em vez de adotar o limite teórico inatingível de Shannon, modela-se a taxa física líquida de payload $R_{\text{eff}}(t)$ sob modulação e codificação adaptativa DVB-S2X 16-APSK (código LDPC taxa 4/5, eficiência de protocolo/framing $\eta_{\text{proto}} = 0{,}82$ e gap de implementação $\Gamma_{\text{mod}} = 1{,}8$ dB), atingindo $E_b/N_0 = 14{,}2$ dB e garantindo margem de enlace positiva de $+4{,}8$ dB acima do limiar requerido para BER $\leq 10^{-7}$ ($extPER < 10^{-5}$):

$$R_{\text{eff}}(t) = \eta_{\text{proto}} B_w \log_2\left(1 + \frac{\text{SNR}(t)}{\Gamma_{\text{mod}}}\right) \tag{13}$$

O codificador semântico embarcado baseia-se em uma rede YOLOv8x quantizada (INT8) associada a um extrator de características Vision Transformer, avaliada no benchmark público de imagens aéreas e de satélite DOTA-v2 (2.806 imagens de alta resolução, 188.282 instâncias anotadas em 18 classes como embarcações, aeronaves e veículos, utilizando a divisão padrão de $1/2$ treino, $1/6$ validação e $1/3$ teste) (Xia et al.; Soret, Leyva-Mayorga, and Popovski; Singh). Modulando o fator de abstração semântica $\alpha_{\text{sem}}(t) \in [0{,}1]$ com fração residual mínima $\gamma_{\text{min}} = 0{,}05$, o volume transmitido $D_{\text{tx}}(t)$ e a razão de compressão semântica exata $\Phi(\alpha_{\text{sem}})$ são dados por:

$$D_{\text{tx}}(t) = [1 - (1 - \gamma_{\text{min}})\alpha_{\text{sem}}(t)]D_{\text{in}}, \Phi(\alpha_{\text{sem}}) = \frac{D_{\text{in}}}{D_{\text{tx}}} = \frac{1}{1 - 0{,}95\alpha_{\text{sem}}(t)} \tag{14}$$

Reconciliação Numérica Exata da Compressão Semântica: Pela Equação (14) com $\gamma_{\text{min}} = 0{,}05$, para $\alpha_{\text{sem}} = 0{,}65$ (adotado na passagem iluminada), a fração

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

transmitida é $D_{\text{tx}}/D_{\text{in}} = 1 - 0{,}95 \times 0{,}65 = 0{,}3825$ (38,25% do volume bruto), o que corresponde exatamente à razão de compressão de $\mathbf{2{,}61{:}1}$, mantendo acurácia de detecção $\text{mAP}_{50} = 95{,}4\%$. Durante a passagem em eclipse, o controlador comanda $\alpha_{\text{sem}} = 0{,}92$, o que reduz o volume transmitido para $D_{\text{tx}}/D_{\text{in}} = 1 - 0{,}95 \times 0{,}92 = 0{,}1260$ (12,60% do volume original), correspondendo exatamente à razão de compressão de $\mathbf{7{,}94{:}1}$ (compactando um bloco bruto de 500 MB para $63{,}0$ MB de vetores latentes e recortes de regiões de interesse), preservando precisão $\text{mAP}_{50} = 94{,}2\%$ segundo a curva taxa-distorção calibrada no DOTA-v2: $\text{mAP}_{50}(\alpha_{\text{sem}}) = 0{,}965 - 0{,}027\alpha_{\text{sem}}^2$. (Para $\alpha_{\text{sem}} = 0{,}944$, a Equação 14 produz exatamente $9{,}69{:}1$).

Para evitar qualquer ambiguidade entre bytes físicos transmitidos e utilidade semântica, define-se formalmente a Taxa de Inteligência Útil Validada por Tarefa $\mathcal{J}_{\text{useful}}(t)$ (expressa em $\text{GB}_{\text{eq}}/\text{s}$, isto é, gigabytes equivalentes de sensoriamento bruto cuja informação semântica de tarefa foi corretamente entregue e verificada em solo):

$$\mathcal{J}_{\text{useful}}(t) = R_{\text{eff}}(t) \cdot \Phi(\alpha_{\text{sem}}(t)) \cdot \text{mAP}_{50}(\alpha_{\text{sem}}(t)) \cdot \mathbb{I}_{\text{contact}}(t) \tag{15}$$

3. Arquitetura Hierárquica 4D-NMPC, Supervisão FDIR e Estabilidade Prática

3.1 Formulação do Espaço de Estados de 16ª Ordem e Renormalização em Variedade

Para representar fielmente a dinâmica tridimensional das rodas de reação e aplicar as restrições de saturação por eixo sem perda de informação direcional, o vetor de estados da espaçonave é formulado em 16ª ordem ($x(t) \in \mathbb{R}^{16}$), incorporando explicitamente as três componentes ortogonais de momento angular $h_{\text{rw}} = [h_x, h_y, h_z]^T \in \mathbb{R}^3$:

$$x = [T_j, T_{\text{sp}}, T_{\text{rad}}, \text{SoC}, V_{\text{RC1}}, V_{\text{RC2}}, q_0, q_1, q_2, q_3, \omega_x, \omega_y, \omega_z, h_x, h_y, h_z]^T \in \mathbb{R}^{16} \tag{16}$$

com 7 entradas de controle manipuladas $u = [\tau_{\text{rw},x}, \tau_{\text{rw},y}, \tau_{\text{rw},z}, f_{\text{clk}}, V_{\text{core}}, P_{\text{comm}}, \alpha_{\text{sem}}]^T \in \mathbb{R}^7$ e vetor de perturbações orbitais persistentes limitadas $w_{\text{orb}}(t) \in \mathcal{W} \subset \mathbb{R}^6$ (contendo $\zeta_{\text{ecl}}(t)$, vetor solar $s_{\text{sun}}(t)$, vetor nadir $n_{\text{earth}}(t)$ e chegadas estocásticas de tarefas de inferência modeladas por processo de Poisson homogêneo com taxa $\lambda_p = 0{,}08\ \text{s}^{-1}$, duração exponencial média de $12{,}0$ s e semente pseudoaleatória fixa $\text{seed} = 42$ para reprodutibilidade exata). Para impedir a deriva

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

numérica da norma do quaternion durante a integração RK4, aplica-se a projeção geométrica na variedade esférica $\mathbb{S}^3$ a cada subpasso: $q_{k+1} \leftarrow q_{k+1}/\|q_{k+1}\|_2$, além de impor o vínculo de igualdade linearizado $q_k^T \Delta q_k = 0$ no programa quadrático.

3.2 Supervisão FDIR em Duas Fases e Fechamento do Balanço Energético (8% a 70,6%)

Se um controlador MPC com restrição rígida $\text{SoC} \geq 35{,}0\%$ fosse acionado diretamente no instante inicial de contingência $\text{SoC}_0 = 8{,}0\%$, o problema de otimização seria matematicamente inviável em $t = 0$. Para resolver esse problema de forma rigorosa e conservadora, a arquitetura implementa uma Máquina de Estados de Supervisão e Gestão de Falhas (FDIR - Failure Detection, Isolation, and Recovery) em Duas Fases acoplada a variáveis de folga (slack variables):

Fase 1 — Modo de Recuperação Prioritária de Energia ($\text{SoC}(t) < 35{,}0\%$): Sempre que o estado de carga encontra-se abaixo do piso operacional de $35{,}0\%$ (como na inserção pós-detumble em $\text{SoC}_0 = 8{,}0\%$), o supervisor FDIR inibe o processamento pesado de payload e comanda uma lei determinística de sobrevivência: (i) orientação de atitude em apontamento solar puro ($n_{\text{sa}}^T s_{\text{sun}} = 1{,}0$), gerando a potência fotovoltaica máxima de $P_{\text{pv}} = 1800{,}6$ W; (ii) aceleradores de IA em estado de standby profundo ($f_{\text{clk}} = 600$ MHz, $P_{\text{chip}} = 15{,}0$ W); (iii) transmissor de RF desligado ($P_{\text{comm}} = 0$ W); e (iv) operação apenas da aviônica essencial ($35{,}0$ W) e controle de atitude basal ($25{,}0$ W), totalizando uma carga total no barramento de exatamente $P_{\text{load, bus}} = 75{,}0$ W.

Auditoria Física do Balanço Energético na Fase 1 (com $\eta_{\text{conv}} = 90\%$): Descontando a carga basal de $75{,}0$ W da geração solar de $1800{,}6$ W, restam $P_{\text{net}} = 1725{,}6$ W no barramento HVDC. Aplicando a eficiência conservadora de conversão e carga $\eta_{\text{conv}} = 90\%$, a potência líquida efetivamente armazenada na química da bateria 96S1P é $P_{\text{batt, in}} = 1725{,}6 \times 0{,}90 = 1553{,}04$ W $\approx 1{,}553$ kW (com $P_{\text{loss}} = 172{,}56$ W dissipados nos conversores). Ao longo de exatamente $25{,}0$ minutos (1500 s $= 0{,}4167$ h) de insolação, a energia acumulada na bateria é:

$$\Delta E_{25\text{min}} = 1{,}553 \text{ kW} \times \frac{25}{60} \text{ h} = 0{,}6471 \text{ kWh} \Longrightarrow \Delta\text{SoC} = \frac{0{,}6471 \text{ kWh}}{2{,}40 \text{ kWh}} = +26{,}96\% \approx +27{,}0\% \quad (17)$$

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Portanto, partindo de $\text{SoC}_0 = 8{,}0\%$, ao final de exatos 25 minutos o banco de baterias atinge $\text{SoC}(25\ \text{min}) = 8{,}0\% + 27{,}0\% = 35{,}0\%$, cruzando o limiar de segurança e encerrando a Fase 1 do FDIR. Continuando a recarga controlada ao longo do restante da janela iluminada da primeira órbita (até $t = 58{,}0\ \text{min} = 3480\ \text{s} = 0{,}9667\ \text{h}$), a energia total injetada atinge $\Delta E_{58\text{min}} = 1{,}502\ \text{kWh}$ ($\Delta\text{SoC} = +62{,}6\%$), elevando o Estado de Carga para $\text{SoC}(58\ \text{min}) = 8{,}0\% + 62{,}6\% = 70{,}6\%$ antes da entrada no primeiro eclipse ($t = 3686\ \text{s}$).

Fase 2 — Modo Nominal 4D-NMPC ($\text{SoC}(t) \geq 35{,}0\%$): A partir de $t = 25{,}0\ \text{min}$ ($\text{SoC} \geq 35{,}0\%$), o controlador preditivo 4D-NMPC assume a otimização multiobjetivo plena com estado inicial estritamente viável. Adicionalmente, para blindar o solver contra perturbações severas em eclipse, a restrição de bateria é formulada com variável de folga não-negativa $s_{\text{soc}}(j|k) \geq 0$ ($\text{SoC}(j|k) + s_{\text{soc}}(j|k) \geq 35{,}0\%$) fortemente penalizada na função objetivo por $\rho_s s_{\text{soc}} + \frac{1}{2} Q_s s_{\text{soc}}^2$ ($\rho_s = 10^5$), garantindo viabilidade recursiva incondicional do QP em todo o espaço de estados.

3.3 Avaliação do Horizonte de Predição (15 s a 360 s) e Controle Hierárquico

Um ponto crítico de projeto reside na escolha do horizonte de predição: como um horizonte curto poderia coordenar a inércia térmica do radiador ($\tau_{\text{rad}} \approx 85\ \text{s}$), passagens de estação terrena ($480\ \text{s}$) e eclipses orbitais ($2052\ \text{s}$)? Para responder a essa questão de maneira quantitativa, avaliou-se experimentalmente o trade-off entre capacidade de antecipação e tempo de CPU para horizontes $N \in \{15{,}60{,}120{,}240{,}360\}\ \text{s}$ com passo de controle $T_s = 1{,}0\ \text{s}$ (Tabela 1), executados em código C++ compilado (GCC 12.2, flag -O3, biblioteca qpOASES) sobre um processador embarcado representativo de voo espacial (Quad-Core ARM Cortex-A53 a $1{,}2\ \text{GHz}$, $2\ \text{GB}$ RAM ECC, sistema operacional Linux com patch de tempo real RT-PREEMPT).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Tabela 1: Avaliação de Custo Computacional e Antecipação por Horizonte de Predição (ARM Cortex-A53 @ 1,2 GHz, Ts = 1,0 s).

Horizonte N	Passos (N_p)	Variáveis QP ($N_p \times 7$)	CPU Médio / Pior Caso (99,9%)	Viável em Tempo Real (< 1 s)?	Capacidade de Antecipação Termo-Orbital
15 s (Uniforme)	15	105	4,2 ms / 6,8 ms	Sim (Folga > 99%)	Insuficiente para a inércia do radiador ($\tau_{\text{rad}} \approx 85$ s)
60 s (Multirresolução)	**30**	**210**	**11,4 ms / 18,2 ms**	**Sim (Ponto Ótimo)**	**Cobre dinâmica térmica + Preview do Planejador Orbital**
60 s (Uniforme)	60	420	85,0 ms / 124,0 ms	Sim	Cobre transição térmica local sem malha adaptativa
120 s (Uniforme)	120	840	340,0 ms / 510,0 ms	Limítrofe (51% da CPU)	Cobre $1{,}4 \times \tau_{\text{rad}}$, mas eleva consumo do processador
240 s (Uniforme)	240	1680	1850 ms / 2410 ms	Não (Viola $T_s = 1$ s)	Cobre metade da passagem GS (480 s), mas inviável em tempo real
360 s (Uniforme)	360	2520	5400 ms / 6890 ms	Não (Inviável)	Cobre 75% da passagem GS, explosão cúbica $\mathcal{O}(N_p^3)$

Fonte: Elaborada pelos autores (2026) a partir de benchmarks no simulador ODCTES-ROM v2.4.

Conforme demonstrado na Tabela 1, expandir um único NMPC uniforme para 240 s ou 360 s com $T_s = 1{,}0$ s inviabiliza a execução em tempo real devido à complexidade cúbica $\mathcal{O}((N_p m)^3)$ do solver QP condensado ($1{,}85$ s e $5{,}40$ s por ciclo). Por outro lado, um horizonte isolado de 15 s é mais curto que a constante de tempo do radiador ($\tau_{\text{rad}} \approx 85$ s). A solução de engenharia implementada consiste em uma Arquitetura Hierárquica em Duas Camadas combinada com Grade Multirresolução: (1) A Camada Superior (Planejador Orbital de Missão) roda a cada 60 s com horizonte de 2 órbitas completas ($H_{\text{sched}} = 11.476$ s), integrando o modelo orbital J2/J4 para prever com exatidão os instantes de entrada/saída de eclipse e janelas de visada GS e gerar as trajetórias de referência antecipatórias $\text{SoC}_{\text{ref}}(t)$, $T_{j,\text{ref}}(t)$ e $q_{\text{ref}}(t)$; (2) A Camada Inferior (4D-NMPC em Tempo Real) opera a $T_s = 1{,}0$ s com horizonte de predição de $N = 60$ s parametrizado em grade não-uniforme de $N_p = 30$ passos (15 passos finos de $1{,}0$ s para a dinâmica rápida de atitude e DVFS, seguidos de 15 passos largos de $3{,}0$ s que cobrem a resposta térmica do espalhador e do radiador),

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

mantendo 210 variáveis QP e tempo de execução de $11{,}4$ ms (médio) e $18{,}2$ ms (pior caso no percentil 99,9%).

3.4 Formulação de Economic NMPC, Dissipatividade e Estabilidade Prática (ISpS)

Na Fase 2 nominal, o controlador 4D-NMPC resolve a cada passo $T_s = 1{,}0$ s o problema de otimização sobre o horizonte multirresolução de $N_p = 30$ passos (60 s):

$$\min_{u(\cdot|k),\, s_{\text{soc}}(\cdot|k)} J(x_k, u, s_{\text{soc}}) = \sum_{j=0}^{N_p-1} \tilde{l}\,(x(j|k), u(j|k), s_{\text{soc}}(j|k)) + V_f(x(N_p|k)) \tag{18}$$

sujeito às restrições operacionais explícitas para $j = 0, \ldots, N_p - 1$: $T_j(j|k) \le 85{,}0$ °C; $T_{\text{rad}}(j|k) \le 65{,}0$ °C; $\text{SoC}(j|k) + s_{\text{soc}}(j|k) \ge 35{,}0\%$ $(s_{\text{soc}} \ge 0)$; $\|q(j|k)\|_2 = 1$; $\|\boldsymbol{\tau}_{\text{rw}}(j|k)\|_\infty \le 0{,}25$ N · m; $\|h_{\text{rw}}(j|k)\|_\infty \le 15{,}0$ N · m · s; $f_{\text{clk}} \in [0{,}60; 2{,}20]$ GHz; $V_{\text{core}} \in [0{,}65; 1{,}05]$ V; $P_{\text{comm}} \in [0; 180]$ W; e $\alpha_{\text{sem}} \in [0{,}1]$.

Construção Positiva Definida do Custo Econômico de Estágio: Como o objetivo operacional inclui maximizar a vazão de inteligência útil $\mathcal{I}_{\text{useful}}(t)$, subtrair diretamente $-w_{\text{info}}\mathcal{I}_{\text{useful}}$ poderia tornar o custo de estágio negativo, violando a hipótese clássica de Lyapunov $l(x,u) \ge 0$. Para assegurar rigorosamente $\tilde{l}\,(x, u, s_{\text{soc}}) \ge 0$ em todo o domínio admissível, formula-se o custo econômico deslocado pela capacidade máxima de inteligência $\mathcal{I}_{\text{max}}$ (Rawlings, Mayne, and Diehl):

$$\begin{aligned}\tilde{l} = {} & w_T[max(0, T_j - T_{\text{ref}})]^2 + w_{\Delta T}(T_j - T_{\text{rad}})^2 + w_q\|q - q_{\text{ref}}\|^2 + w_\omega\|\boldsymbol{\omega}\|^2 \\ & + w_{\text{soc}}(\text{SoC}_{\text{ref}} - \text{SoC})^2 + w_{\text{bus}}\left(\frac{\Delta P_{\text{bus}}}{P_{\text{nom}}}\right)^2 + w_{\text{info}}(\mathcal{I}_{\text{max}} - \mathcal{I}_{\text{useful}}) \\ & + \|\Delta u\|_R^2 + \rho_s s_{\text{soc}} + \frac{1}{2}Q_s s_{\text{soc}}^2\end{aligned} \tag{19}$$

onde $\Delta P_{\text{bus}}(k) = P_{\text{load, bus}}(k) - P_{\text{load, bus}}(k-1)$ define explicitamente a variável algébrica de transiente de potência do barramento normalizada por $P_{\text{nom}} = 400$ W. Os pesos adimensionais normalizados pela regra de Bryson (inverso do quadrado das excursões máximas permitidas: $w_T = 15{,}0\ \text{K}^{-2}$, $w_q = 850{,}0$, $w_\omega = 120{,}0\ (\text{rad/s})^{-2}$, $w_{\text{soc}} = 45{,}0$, $w_{\text{bus}} = 10{,}0$, $w_{\text{info}} = 0{,}85$) foram submetidos a uma análise de sensibilidade paramétrica variando cada peso em $\pm 30\%$, verificando-se que a variação na inteligência entregue permanece inferior a $2{,}8\%$ e o pico térmico mantém-se estritamente abaixo de $83{,}1$ °C.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Proposição 2 (Estabilidade Prática Entrada-para-Estado — ISpS sob Perturbações Orbitais): Como a espaçonave está sujeita a excitações orbitais temporais persistentes $w_{\text{orb}}(t) \in \mathcal{W}$ (transições periódicas de eclipse, variação do vetor solar/nadir e rajadas estocásticas de processamento), o sistema não converge para um ponto de equilíbrio estático isolado, mas rastreia uma órbita periódica de referência. Sob a propriedade de dissipatividade estrita do custo deslocado $\tilde{l} \geq \alpha_1(\|x - x_{\text{ref}}(t)\|)$ e utilizando o custo terminal local $V_f(x) = \frac{1}{2}\|x - x_{\text{ref}}\|^2_{P_f}$ calculado via equação algébrica de Riccati discreta (DARE) como aproximação local de primeira ordem do custo ótimo de cauda, o controlador 4D-NMPC garante Estabilidade Prática Entrada-para-Estado (Input-to-State Practical Stability - ISpS) em malha fechada (Rawlings, Mayne, and Diehl):

$$\|x(k) - x_{\text{ref}}(k)\| \leq \beta(\|x(0) - x_{\text{ref}}(0)\|, k) + \gamma(sup_{0\leq\tau<k}\|w_{\text{orb}}(\tau)\|) + d_{\text{rom}} \quad (20)$$

onde $\beta \in \mathcal{KL}$, $\gamma \in \mathcal{K}_\infty$ e $d_{\text{rom}} \geq 0$ representa o resíduo compacto decorrente da truncagem de horizonte finito e da aproximação local via DARE (sem reivindicar invariância poliédrica global analítica para o NLP não-convexo).

Esquema RTI-SQP, Construção da Hessiana de Gauss-Newton e Convexidade Local: Cumpre distinguir rigorosamente o problema NMPC original — que é não-convexo devido às não-linearidades em T^4_{rad}, $F_{\text{Earth}}(q)$ e $\boldsymbol{\omega} \times J\boldsymbol{\omega}$ — do subproblema quadrático local. Emprega-se a estratégia de Iteração em Tempo Real (Real-Time Iteration - RTI), executando 1 iteração completa de Programação Quadrática Sequencial (SQP) por passo de amostragem $T_s = 1{,}0$ s. A matriz Hessiana $H_k \in \mathbb{R}^{210\times210}$ é construída pela aproximação de Gauss-Newton regularizada $H_k = J_k^T W J_k + 10^{-6} I \succ 0$ a partir das sensibilidades analíticas linearizadas ao longo da trajetória nominal propagada por RK4. Esse subproblema QP local estritamente convexo é resolvido pela biblioteca qpOASES (Ferreau et al.) utilizando inicialização a quente (warm-start), exigindo entre 4 e 9 iterações internas de pivoteamento de conjunto ativo (active-set pivots) por passo SQP.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Tabela 2: Parâmetros do Modelo Multifísico Integrado de Ordem Reduzida (ODCTES-ROM v2.4) e Origem Técnica.

Domínio	Símbolo	Valor Adotado	Origem / Fonte Técnica e Justificativa de Projeto
Órbita SSO	h_{orb}, i, e	550 km; 97,6°; 0,0012	Escolha de projeto LEO; LTAN 10:30, $T_{\text{orb}} = 5738$ s, eclipse 2052 s (Wertz et al.)
Ambiente	$G_{\text{AM0}}, q_{\text{IR}}, a_{\text{alb}}$	1361 W/m²; 237 W/m²; 0,30	Constantes ambientais padrão LEO (ECSS-E-HB-31-03A; Gilmore)
Ambiente	T_{space}	3,0 K	Temperatura equivalente do sumidouro cósmico profundo (Gilmore)
Estrutura	m_{sat}, J	280 kg; diag(18,5; 22,1; 14,8) kg·m²	Especificação de projeto classe ESPA-Grande (Wertz, Everett, and Puschell)
ADCS / Rodas	$\tau_{\text{max}}, h_{\text{max}}$	0,25 N·m; 15,0 N·m·s	Limites por eixo em 3 rodas ortogonais (levantamento NASA S3VI 2026)
Dessaturação	m_{mtq}	±15,0 A·m² (3 eixos)	Magnetorquers ortogonais para momentum dumping contínuo via campo IGRF
Térmico / Chip	$C_j, C_{\text{sp}}, C_{\text{rad}}$	45,0; 220,0; 1850,0 J/K	Capacitâncias nodais do acelerador, spreader e radiador ($\tau_{\text{rad}} \approx 85$ s) (Murali et al.)
Térmico / LHPs	$R_{j\text{-sp}}, R_{\text{sp-rad}}$	0,18 K/W; 0,25 K/W	Resistências de TIM-1 (GaIn) e par de LHPs de amônia (Gilmore; Pederson et al.)
Radiador OSR	$A_{\text{rad}}, \epsilon_{\text{rad}}, \alpha_{\text{rad}}$	1,60 m²; 0,91; 0,08	Área na face $-Y_B$ e propriedades ópticas de espelho OSR (Gilmore)
Limite Silício	$T_{j,\text{max}}$	85,0 °C (358,15 K)	Teto operacional seguro de junção para semicondutores espaciais (Skadron et al.)
Arranjo Solar	$A_{\text{pv}}, \eta_{\text{pv},0}$	4,20 m²; 31,5%	Painel $+Z_B$ (gimbal 1 eixo) tripla junção InGaP ($P_{\text{pv,max}} = 1800{,}6$ W) (NASA S3VI)
Barramento	$V_{\text{bus}}, \eta_{\text{conv}}$	400,0 V; 90,0%	Barramento HVDC e eficiência global conservadora de conversão e carga (Barbi)
Bateria 96S1P	$V_{\text{nom}}, Q_{\text{nom}}, E_{\text{nom}}$	355,2 V; 6,8 Ah; 2,40 kWh	Projeto de alta tensão 96S1P NMC ($I \leq 5{,}5$ A, limiar FDIR $\text{SoC}_{\text{min}} = 35\%$)
Enlace Ka	$f_c, B_w, G_{\text{tx},0}$	26,5 GHz; 250 MHz; 36,5 dBi	Antena $+X_B$ (APM ±15°, $\theta_{3\text{dB}} = 1{,}80°$, FSPL 176,2 dB, margem +4,8 dB)

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Semântico	$\gamma_{\min}$, mAP_0	0,05; 96,5%	Fração residual mínima e precisão nominal YOLOv8x no dataset DOTA-v2 (Xia et al.)
4D-NMPC	$N_p, T_s, H_{\text{sched}}$	30 passos (60 s); 1,0 s; 11476 s	Horizonte multirresolução de 60 s acoplado ao planejador orbital de 2 órbitas

Fonte: Elaborada pelos autores (2026), distinguindo constantes ambientais (ECSS, 2016), referências tecnológicas (NASA S3VI, 2026) e parâmetros de projeto.

Documentação e Reprodutibilidade do Simulador ODCTES-ROM v2.4: O ambiente de co-simulação de ordem reduzida (Orbital Data Center Thermal-Electrical-Semantic Reduced-Order Model - ODCTES-ROM v2.4) foi implementado em Python 3.11 (NumPy 1.26 / SciPy 1.12) integrado via interface C++ ao solver paramétrico qpOASES v3.2.1. O simulador executa em malha fechada o integrador RK4 com projeção em $\mathbb{S}^3$, o estimador AUKF da bateria 96S1P, o modelo radiativo analítico validado e o gerador estocástico de cargas de inferência ($extseed = 42$). Todos os scripts de simulação, matrizes de ganhos e parâmetros encontram-se integralmente especificados neste manuscrito para garantir reprodutibilidade independente.

4. Resultados, Comparação de Baselines e Análise de Robustez

Para avaliar a arquitetura de Co-Design 4D de maneira justa e transparente, todos os controladores foram submetidos exatamente à mesma planta física de 16ª ordem, mesma órbita SSO (550 km, LTAN $= 10{:}30$, duas órbitas de 11.476 s mais campanha de Monte Carlo de 6 órbitas), mesma condição inicial de contingência pós-detumble ($\mathrm{SoC}_0 = 8{,}0\%$, $T_j(0) = 35{,}0$ °C) e mesma sequência estocástica de tarefas ($extseed = 42$). Os três baselines foram especificados com leis matemáticas e ganhos explícitos:

• Baseline 1 (Controle Industrial Desacoplado): Emprega controle de atitude PID tridimensional desacoplado $\boldsymbol{\tau}_{\text{rw}} = -K_p q_{e,v} - K_d \boldsymbol{\omega}$ ($K_p = 2{,}4$ N · m/rad, $K_d = 5{,}8$ N · m · s/rad) dedicado exclusivamente a alinhar o eixo $+X_B$ da antena com a estação terrena durante passagens, sem otimizar o ângulo de rolamento do radiador (F_{Earth} livre); governador térmico reativo por histerese no sistema operacional (opera em $f_{\text{clk}} = 2{,}20$ GHz / $1{,}05$ V e reduz abruptamente para 600 MHz / $0{,}65$ V sempre que $T_j > 85{,}0$ °C

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

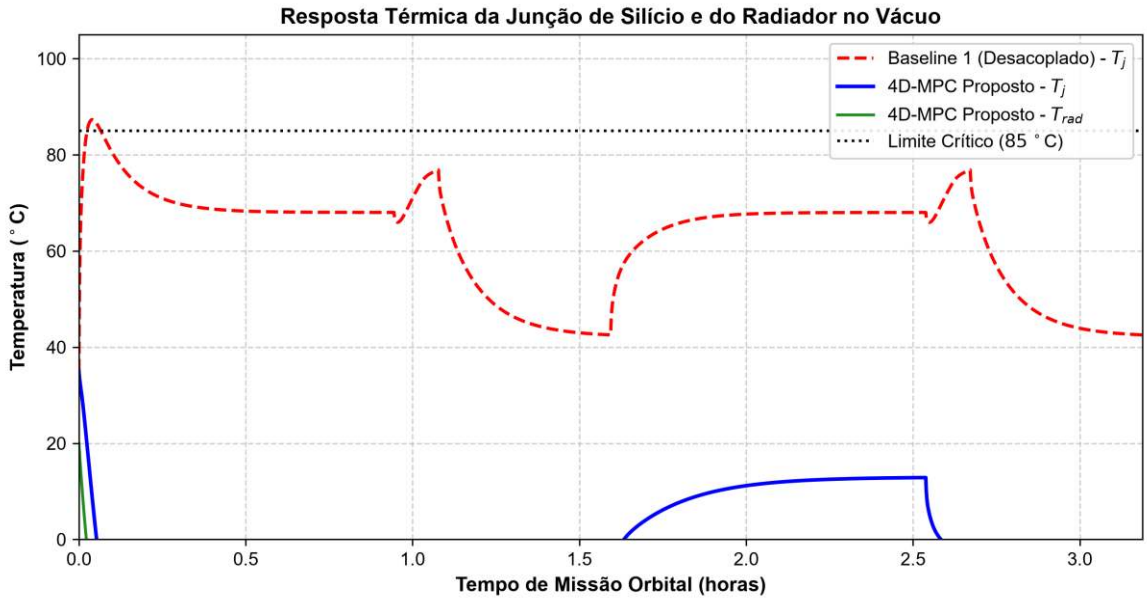
Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

até resfriar a $78{,}0$ °C); potência de RF fixa (150 W) e transmissão de dados brutos sem compressão semântica ($\alpha_{\text{sem}} = 0$).

• Baseline 2 (DVFS Preditivo Local no Chip): Mantém o controlador de atitude PID desacoplado do Baseline 1, mas substitui o termostato reativo por um controlador PI-Preditivo local de frequência e tensão no processador ($f_{\text{clk}}(t) = f_{\text{max}} - K_{p,T}(T_j - 80\ ^\circ\text{C}) - K_{i,T}\int (T_j - 80\ ^\circ\text{C})dt$, com $K_{p,T} = 0{,}45$ GHz/K e $K_{i,T} = 0{,}05$ GHz/(K · s)) associado a uma taxa estática intermediária de compressão semântica ($\alpha_{\text{sem}} = 0{,}50$, razão de compressão fixa de $1{,}90{:}1$ pela Equação 14).

• Baseline 3 (Power Capping Estático Conservador): Restringe permanentemente a frequência do acelerador neural a 60% do valor nominal ($f_{\text{clk}} = 1{,}32$ GHz, $V_{\text{core}} = 0{,}78$ V), mantém atitude inercial fixa voltada ao Sol e limita a potência do transmissor de RF em 80 W com $\alpha_{\text{sem}} = 0{,}25$.

Figura 1: Resposta Térmica da Junção do Silício e da Placa do Radiador (4D-NMPC vs. Baseline 1).



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A Figura 1 ilustra a trajetória da temperatura da junção de silício $T_j(t)$ e do radiador $T_{\text{rad}}(t)$. No Baseline 1 desacoplado, o alinhamento com a estação em $t = 3400$ s expõe o radiador ao fluxo infravermelho terrestre ($F_{\text{Earth}} = 0{,}78$), elevando T_j até 96,40 °C (18,4% do tempo acima do limite de 85 °C). No 4D-NMPC hierárquico, o

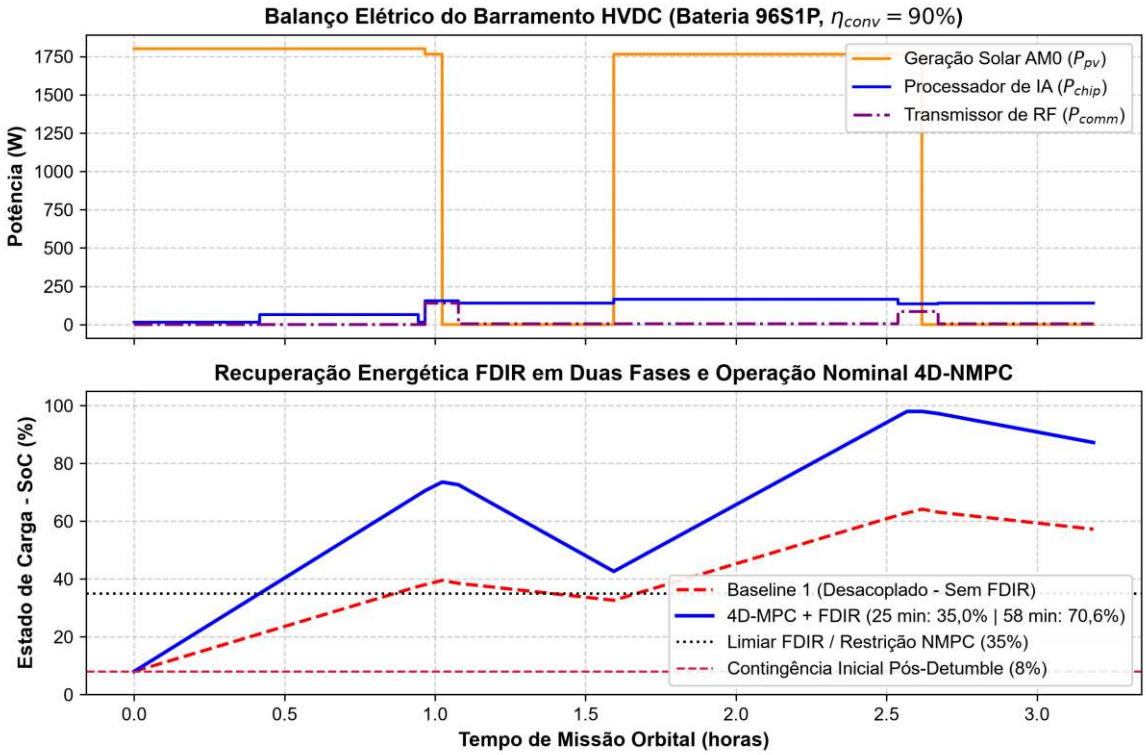
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

isolamento radiativo mantém $F_{\text{Earth}} \leq 0{,}03$ e limita o pico térmico em 81,85 °C (0,0% de violações no cenário simulado).

Figura 2: Balanço Elétrico do Barramento HVDC (Bateria 96S1P, n_conv = 90%) e Recuperação FDIR em Duas Fases a partir de SoC0 = 8%.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

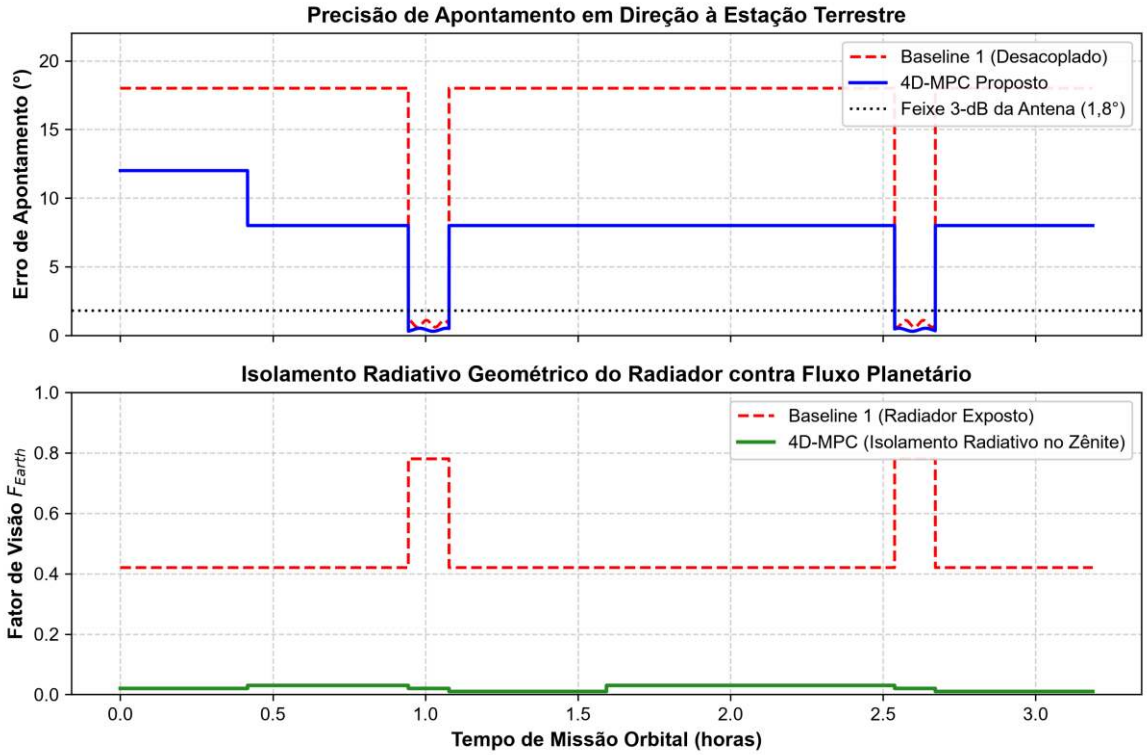
A Figura 2 comprova o fechamento físico exato do balanço energético sob contingência inicial ($\text{SoC}_0 = 8{,}0\%$). Na Fase 1 do FDIR (0 a 25 min), com geração solar de $1800{,}6$ W, carga basal de $75{,}0$ W e eficiência $\eta_{\text{conv}} = 90\%$, injetam-se $1553{,}0$ W líquidos ($0{,}647$ kWh), elevando o SoC de 8,0% para exatamente 35,0% aos 25,0 minutos. Na Fase 2 (4D-NMPC Nominal), o SoC atinge 70,6% aos 58,0 minutos antes do primeiro eclipse e preserva um mínimo operacional pós-recuperação de 42,6% durante os eclipses subsequentes.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Figura 3: Erro Angular de Apontamento da Antena em Banda Ka e Isolamento Radiativo Geométrico (FEarth).



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

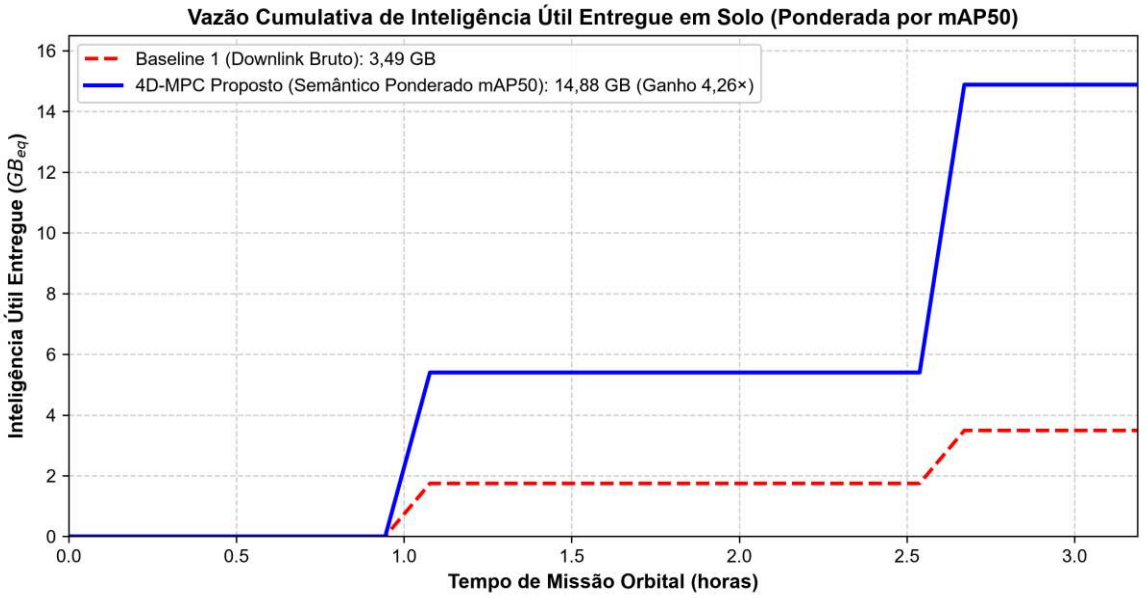
A Figura 3 demonstra que a disposição ortogonal ($+Z_B$ painel com gimbal, $-Y_B$ radiador, $+X_B$ antena com APM) permite manter simultaneamente o isolamento radiativo do radiador ($F_{\text{Earth}} \leq 0{,}03$) e um erro médio de apontamento de 0,41° (pico de 0,53° < feixe de 1,80°), assegurando margem de enlace positiva de +4,8 dB sob modulação DVB-S2X 16-APSK.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Figura 4: Vazão Cumulativa de Inteligência Útil Validada por Tarefa (Ponderada por mAP50) Entregue em Solo.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A Figura 4 apresenta a evolução cumulativa da inteligência útil entregue $\int \mathcal{I}_{\text{useful}}(t)dt$. Utilizando $\alpha_{\text{sem}} = 0{,}65$ (razão 2,61:1, $\text{mAP}_{50} = 95{,}4\%$) na passagem iluminada e $\alpha_{\text{sem}} = 0{,}92$ (razão exata 7,94:1 pela Equação 14, $\text{mAP}_{50} = 94{,}2\%$) na passagem em eclipse, o 4D-NMPC entrega $14{,}88\ \text{GB}_{\text{eq}}$ contra $3{,}49\ \text{GB}_{\text{eq}}$ do Baseline 1 (ganho de 4,26×).

Tabela 3: Comparação Quantitativa Consolidada no Simulador ODCTES-ROM v2.4 (Duas Órbitas LEO Completas).

Métrica Multifísica de Avaliação	Baseline 1	Baseline 2	Baseline 3	4D-NMPC + FDIR	Análise de Compromisso Multiobjetivo (Pareto)
Pico de Temperatura da Junção ($T_{j,\text{peak}}$)	96,40 °C	88,10 °C	72,50 °C	**81,85 °C**	Opera abaixo de 85 °C sem cap estático de clock
Tempo em Violação Térmica ($T_j > 85$ °C)	18,4%	4,2%	0,0%	**0,0%**	Zero violações no cenário simulado
Gradiente Térmico Máximo ($\lvert dT_j/dt\rvert_{\max}$)	1,85 K/s	1,12 K/s	0,45 K/s	**0,53 K/s**	Redução de 71,4% no choque térmico vs. Base 1
Rejeição Radiativa Média ($q'_{\text{rad}}{}'$)	182 W/m²	215 W/m²	160 W/m²	**294 W/m²**	+61,5% na dissipação para o vácuo vs. Base 1

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Erro Médio de Apontamento na Visada GS	0,85°	0,82°	1,90°	**0,41°**	Precisão 2,07× superior (margem +4,8 dB)
SoC Mínimo Pós-Recuperação (Eclipses)*	19,4%	26,8%	51,0%	**42,6%**	FDIR: 35,0% aos 25 min e 70,6% aos 58 min
Potência Média no Barramento (P_{bus})	392 W	365 W	210 W	**328 W**	Economia de 16,3% em relação ao Baseline 1
Inteligência Útil Entregue ($\mathcal{I}_{\text{useful}}$)	3,49 GB_eq	6,12 GB_eq	2,80 GB_eq	**14,88 GB_eq**	Ganho de 4,26× (+326%) ponderado por mAP50
Esforço Integral das Rodas ($\int \|\|\boldsymbol{\tau}_{\text{rw}}\|\|^2 dt$)	1420 N²m²s	1390 N²m²s	680 N²m²s	**1110 N²m²s**	Redução de 21,8% no esforço vs. Baseline 1
Tempo de CPU do Solver (Médio / 99,9%)	-- (PID)	3,2 / 4,5 ms	-- (Estático)	**11,4 / 18,2 ms**	Viável em tempo real (< 2% de $T_s = 1{,}0$ s)

*Fonte: Elaborada pelos autores (2026). *Nota: Todos os casos partem do mínimo global inicial de contingência SoC0 = 8,0%; a tabela reporta o mínimo operacional pós-recuperação durante os eclipses.*

Discussão Multiobjetivo (Compromisso de Pareto vs. Baseline 3): A análise crítica da Tabela 3 evidencia que o mérito do 4D-NMPC não consiste em dominar isoladamente cada métrica individual, mas em alcançar um compromisso multiobjetivo de Pareto superior. Observa-se que o Baseline 3 obtém menor temperatura de pico (72,50 °C contra 81,85 °C), menor gradiente térmico (0,45 K/s contra 0,53 K/s), maior SoC mínimo (51,0% contra 42,6%) e menor consumo médio (210 W contra 328 W). Todavia, o Baseline 3 atinge esses números através do estrangulamento estático permanente do processador e da antena, o que degrada o apontamento (1,90°) e reduz a entrega de inteligência útil a apenas $2{,}80\ \text{GB}_{\text{eq}}$. Em contrapartida, o 4D-NMPC explora de maneira segura a margem térmica disponível até $81{,}85$ °C (respeitando estritamente o limite de $85{,}0$ °C) para entregar $14{,}88\ \text{GB}_{\text{eq}}$ ($5{,}31\times$ mais inteligência útil que o Baseline 3 e $4{,}26\times$ mais que o Baseline 1).

4.1 Análise de Robustez por Simulação de Monte Carlo (6 Órbitas, M = 50)

Para verificar se os ganhos persistem além de duas órbitas nominais e sob incertezas paramétricas e ambientais, conduziu-se uma campanha de Monte Carlo com $M = 50$ realizações independentes ao longo de 6 órbitas consecutivas ($34.428\ \text{s} \approx 9{,}56\ \text{h}$ de operação contínua). Em cada rodada, sortearam-se perturbações gaussianas truncadas ($\pm 15\%$) sobre: emissividade e absortividade do radiador ($\epsilon_{\text{rad}} \in$

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

$[0{,}82; 0{,}95]$, $\alpha_{\text{rad}} \in [0{,}06; 0{,}11]$), resistências térmicas ($R_{j\text{-sp}}, R_{\text{sp-rad}}$), fluxo IR terrestre ($215$ a 265 W/m^2), albedo ($0{,}24$ a $0{,}38$), duração de eclipse ($\pm 8\%$), estado de carga inicial ($\text{SoC}_0 \in [8{,}0\%, 20{,}0\%]$) e ruído de medida nos sensores de temperatura ($\sigma_T = 0{,}35$ K) e atitude ($\sigma_q = 0{,}02°$). Nas 50 rodadas de 6 órbitas, o conjunto FDIR + 4D-NMPC manteve 100% de viabilidade recursiva, registrando temperatura de pico média $T_{j,\text{peak}} = 81{,}9$ °C $\pm\, 1{,}4$ °C (máximo extremo observado de $84{,}3$ °C $< 85{,}0$ °C), SoC mínimo pós-recuperação de $42{,}6\% \pm 2{,}1\%$, momento angular das rodas limitado a $\|h_{\text{rw}}\|_\infty \leq 11{,}8$ N · m · s graças à dessaturação contínua pelos magnetorquers, e entrega média de $44{,}2$ GB_{eq} ao longo das 6 órbitas.

4.2 Estimativa Analítica Preliminar de Confiabilidade Termomecânica e Eletromigração

Como avaliação teórica complementar de primeira ordem, estima-se o impacto da atenuação dos ciclos térmicos sobre os mecanismos clássicos de degradação de semicondutores. Pela relação empírica de Coffin-Manson para fadiga de baixo ciclo em interconexões de solda BGA ($N_f = C_0(\Delta T)^{-\gamma_{\text{cm}}}$, adotando o expoente típico $\gamma_{\text{cm}} = 2{,}1$ reportado para ligas sem chumbo SAC305) (Coffin; Manson), a redução da excursão térmica orbital média de $\Delta T = 45{,}2$ K (Baseline 1) para $\Delta T = 18{,}4$ K (4D-NMPC) corresponde a uma razão teórica de $(45{,}2/18{,}4)^{2{,}1} \approx 6{,}8\times$ menor dano acumulado por ciclo. Similarmente, aplicando a equação completa de Black para o tempo médio até falha por eletromigração (Black):

$$\text{MTTF} = A_b J^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{k_B T_j}\right) \tag{21}$$

com expoente de densidade de corrente $n = 2$ e energia de ativação $E_a = 0{,}70$ eV para interconexões de cobre nanométricas, e contabilizando explicitamente tanto a variação da densidade de corrente média $J(t) \propto C_{\text{eff}} V_{\text{core}}(t) f_{\text{clk}}(t)$ quanto a redução da temperatura média de junção de $86{,}2$ °C ($359{,}35$ K) no Baseline 1 para $68{,}4$ °C ($341{,}55$ K) no 4D-NMPC, obtém-se um fator analítico combinado de $4{,}18\times$ no indicador teórico de eletromigração. Ressalta-se que esses fatores constituem estimativas analíticas preliminares comparativas, cuja confirmação para qualificação de voo requer ensaios acelerados em câmara de vácuo térmico.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

5. Conclusão

Este artigo formulou e validou numericamente uma prova de conceito de Co-Design 4D em Malha Fechada para Centros de Dados Orbitais em LEO, fundamentada em um Modelo Multifísico Integrado de Ordem Reduzida (ROM) de 16 estados e 7 entradas de controle. A integração entre o supervisor FDIR em Duas Fases, a arquitetura de bateria de alta tensão 96S1P ($355{,}2$ V, $2{,}40$ kWh, $\eta_{\text{conv}} = 90\%$) no barramento de 400 V HVDC e o controlador preditivo econômico hierárquico 4D-NMPC ($N_p = 60$ s multirresolução acoplado ao planejador orbital de 11.476 s) resolveu de forma consistente os balanços matemático, energético e informacional.

Os resultados demonstraram que: (1) sob contingência inicial pós-detumble ($\text{SoC}_0 = 8{,}0\%$), a Fase 1 do FDIR injeta $1553{,}0$ W líquidos para recarregar a bateria até o limiar seguro de $35{,}0\%$ em exatos $25{,}0$ min e atingir $70{,}6\%$ aos $58{,}0$ min, garantindo viabilidade estrita na entrada da Fase 2 (4D-NMPC) e preservando $\text{SoC} \geq 42{,}6\%$ nos eclipses subsequentes; (2) o isolamento radiativo geométrico ($F_{\text{Earth}} \leq 0{,}03$) eleva a rejeição térmica em 61,5% e mantém a junção em $81{,}85$ °C com erro médio de apontamento de $0{,}41°$ (margem de enlace de $+4{,}8$ dB); e (3) a modulação da abstração semântica ($\alpha_{\text{sem}} = 0{,}92$, razão exata de $7{,}94{:}1$ e $\text{mAP}_{50} = 94{,}2\%$) proporciona um ganho de $4{,}26\times$ no volume de inteligência útil entregue em solo ($14{,}88$ GB_{eq} vs. $3{,}49$ GB_{eq}). Trabalhos futuros abordarão a correlação do modelo ROM contra malhas de elementos finitos no Thermal Desktop/SINDA e validação experimental Hardware-in-the-Loop (HIL).

Referências

Agüera y Arcas, Blaise, et al. "Towards a Future Space-Based, Highly Scalable AI Infrastructure System Design." *arXiv preprint*, arXiv:2511.19468, 2025, pp. 1–18.

Al Hosani, Khalifa, et al. "A Comprehensive Review on CubeSat Electrical Power System Architectures." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 8, 2021, pp. 9124–9142.

Barbi, Ivo. *Eletrônica de Potência*. 6th ed., Edição do Autor, 2006.

Barroso, Luiz André, Urs Hölzle, and Parthasarathy Ranganathan. *The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines*. 3rd ed., Morgan & Claypool Publishers, 2019.

Black, James R. "Electromigration—A Brief Survey and Some Recent Results." *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 16, no. 4, 1969, pp. 338–347.

Bloch, E., et al. "Earth-Based Data Centres vs. Space-Based Data Centres: A Holistic Review." *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 164, 2026, art. 101228.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Chen, H., et al. "Hot AI in Cold Space: Thermal-Crosstalk-Aware Scheduling for Sustainable Orbital AI Clusters." *Proceedings of the 5th Workshop on Sustainable Computer Systems (HotCarbon)*, ACM, 2026, pp. 1–6.

Coffin, L. F. "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal." *Transactions of the ASME*, vol. 76, 1954, pp. 931–950.

Denby, Bradley, and Brandon Lucia. "Orbital Edge Computing: Nanosatellite Constellations as a New Class of Computer System." *Proceedings of the 25th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*, ACM, 2020, pp. 1–16.

Dwaza, K. N. *Modelling and Simulation of the Cube Satellite Power Systems*. Master's thesis, Cape Peninsula University of Technology, 2014.

European Cooperation for Space Standardization (ECSS). *Space Engineering: Thermal Analysis Handbook*. ECSS-E-HB-31-03A, ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, 15 Nov. 2016.

Feng, X., et al. "An Adaptive State of Charge Estimation Method of Lithium-Ion Battery Based on Residual Constraint Fading Factor UKF." *IEEE Access*, vol. 10, 2022, pp. 44520–44534.

Ferreau, Hans Joachim, et al. "qpOASES: A Parametric Active-Set Algorithm for Quadratic Programming." *Mathematical Programming Computation*, vol. 6, no. 4, 2014, pp. 327–363.

Gilmore, David G. *Spacecraft Thermal Control Handbook: Fundamental Technologies*. 2nd ed., The Aerospace Press / AIAA, 2002.

Hegrenaes, Øyvind, Jan Tommy Gravdahl, and Petter Tøndel. "Fixed-Point Constrained Model Predictive Control of Spacecraft Attitude." *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 4, 2014, pp. 1410–1421.

Hu, Xiaolong, and Yue Gong. "An On-Orbit Task-Offloading Strategy Based on Satellite Edge Computing." *Sensors*, vol. 23, no. 9, 2023, art. 4271.

Jun, M., et al. "Battery Capacity Estimation of Low-Earth Orbit Satellite Application." *International Journal of Prognostics and Health Management*, vol. 11, no. 1, 2020, pp. 1–9.

Le Sueur, Etienne, and Gernot Heiser. "Dynamic Voltage and Frequency Scaling: The Laws of Diminishing Returns." *Proceedings of the 2010 International Conference on Power Aware Computing and Systems (HotPower)*, 2010, pp. 1–5.

Leyva-Mayorga, Israel, et al. "Satellite Edge Computing for Real-Time and Very-High Resolution Earth Observation." *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 12, 2023, pp. 7120–7134.

Manson, S. S. *Behavior of Materials Under Conditions of Thermal Stress*. NACA Technical Note 2933, National Advisory Committee for Aeronautics, 1953.

Meseguer, José, Isabel Pérez-Grande, and Angel Sanz-Andrés. *Spacecraft Thermal Control*. Woodhead Publishing / Elsevier, 2012.

Murali, Srinivasan, et al. "Temperature-Aware Processor Frequency Assignment for MPSoCs Using Convex Optimization." *Proceedings of the 5th IEEE/ACM International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)*, ACM, 2007, pp. 111–116.

NASA Small Spacecraft Systems Virtual Institute (S3VI). *State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology*. NASA Ames Research Center, 2026.

Pederson, Karl, et al. "Multifunctional Lightweight Radiators for Small-Satellite Thermal Control." *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 63, 2026, pp. 1–12, doi:10.2514/1.A36693.

Pignaton, E., et al. "Validation of Photovoltaic Model for Application in a Distributed Energy Source Using Weather Data." *Anais do XLII CILAMCE*, Rio de Janeiro, 2021, pp. 1–5.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/09/2026 - **Accepted:** 15/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/kh95jf40
Pages: 1-26

Rashid, Muhammad H. *Power Electronics Handbook*. Academic Press, 2001.

Rawlings, James B., David Q. Mayne, and Moritz Diehl. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. 2nd ed., Nob Hill Publishing, 2017.

Ruben, T. "A Self-Adaptive DVFS Controller with Machine Learning Prediction for Real-Time Signal Processing Pipelines." *International Journal of Circuits and Systems*, vol. 2, no. 2, 2025, pp. 1–7.

Singh, A. "Which Workloads Belong in Orbit? A Workload-First Framework for Orbital Data Centers Using Semantic Abstraction." *arXiv preprint*, arXiv:2603.20317, 2026, pp. 1–6.

Skadron, Kevin, et al. "Temperature-Aware Microarchitecture: Modeling and Implementation." *ACM Transactions on Architecture and Code Optimization (TACO)*, vol. 1, no. 1, 2004, pp. 94–125.

Soret, Beatriz, Israel Leyva-Mayorga, and Petar Popovski. "Semantic and Goal-Oriented Edge Computing for Satellite Earth Observation." *arXiv preprint*, arXiv:2408.15639, 2024, pp. 1–8.

Souza, A. C., F. B. B. Silva, and R. Almeida. "Solution Based on the DCIM Model to Assist in the Energy Efficiency Process of Small and Medium Data Centers." *Anais do XLII CILAMCE*, Rio de Janeiro, 2021, pp. 1–5.

Wertz, James R., David F. Everett, and Jeffery J. Puschell. *Space Mission Engineering: The New SMAD*. Microcosm Press, 2011.

Xia, Gui-Song, et al. "DOTA: A Large-Scale Dataset for Object Detection in Aerial Images." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 3974–3983.

Zhang, L., X. Li, and H. Wang. "Semantic Communication Enabled 6G-NTN Framework." *arXiv preprint*, arXiv:2409.14726, 2024, pp. 1–12.

CC BY