



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Brenda Fernandes Ribeiro

**Escalonamento de Tarefas Orientado a Energia para Garantia de Qualidade de Serviço
em Constelações de Pequenos Satélites**

Florianópolis

2022

Brenda Fernandes Ribeiro

**Escalonamento de Tarefas Orientado a Energia para Garantia de Qualidade de Serviço
em Constelações de Pequenos Satélites**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Eduardo Augusto Bezerra, Dr.

Coorientador: Prof. Laio Oriel Seman, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ribeiro, Brenda Fernandes

Escalonamento de Tarefas Orientado a Energia para
Garantia de Qualidade de Serviço em Constelações de Pequenos
Satélites / Brenda Fernandes Ribeiro ; orientador, Eduardo
Augusto Bezerra, coorientador, Laio Oriel Seman, 2022.

58 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Otimização. 3. Pequenos
satélites. 4. Constelações. 5. Escalonamento de tarefas. I.
Bezerra, Eduardo Augusto. II. Seman, Laio Oriel. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Brenda Fernandes Ribeiro

**Escalonamento de Tarefas Orientado a Energia para Garantia de Qualidade de Serviço
em Constelações de Pequenos Satélites**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Pedro Augusto Munari Junior, Dr.

UFSCar

Prof. Raimundo Celeste Ghizoni Teive, Dr.

UNIVALI

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Eduardo Augusto Bezerra, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2022.

RESUMO

Com o advento dos pequenos satélites, tornam-se cada vez mais acessíveis as constelações espaciais. Como consequência da menor área superficial e volume reduzido, respectivamente, a geração e armazenamento de energia em pequenos satélites possuem limitações, o que impulsiona indústria e a comunidade científica ao encontro de meios de aprimoramento da qualidade de serviço (QoS). Neste contexto, esta pesquisa apresenta uma ferramenta de planejamento de missões multi-satélite, constituída de uma formulação de Programação Inteira Mista (MIP), que modela as principais características e dificuldades deste tipo de missão por meio de restrições de gerenciamento de energia disponível, além de tarefas com prioridades dinâmicas, quantidades de inicializações, de tempo de execução, além da possibilidade de execução simultânea ou redundante nos múltiplos satélites. O modelo considera tarefas coletivas, que podem ser realizadas por quaisquer satélites, e tarefas individuais, destinadas a um único satélite. Baseada nesta divisão e fundamentada no estado-da-arte sobre otimização multiobjetivo, a formulação possibilita a análise da fronteira de Pareto, que viabiliza a avaliação do *trade-off* entre a QoS da constelação e das tarefas individuais. Cenários distintos foram simulados, considerando diferentes quantidades de satélite, modelos multiobjetivo, bem como encorajamento de redundância, o que reforçou a vasta aplicabilidade e adaptabilidade do modelo a requisitos distintos. Os resultados revelaram uma relação exponencial entre o tempo de resolução em função da quantidade de satélites, sendo esta relação mais acentuada quando considerado, na função objetivo, o termo de redundância. Mesmo assim, todos os cenários foram resolvidos em tempo inferior à duração da órbita simulada, sendo a maior duração pouco superior a 20 minutos na simulação de uma constelação com 5 satélites, órbita de 96 minutos, 20 tarefas individuais e 5 tarefas coletivas com redundância estimulada. Além disso, observou-se que o estímulo de execução redundante das tarefas coletivas não exerce influência significativa sobre a QoS coletiva nem a individual. Entende-se que os resultados apresentados viabilizam o modelo como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão para operadores de missões multi-satélite.

Palavras-chave: Otimização. Pequenos satélites. Constelações. Escalonamento de tarefas.

ABSTRACT

With the advent of small satellites, space constellations have become increasingly accessible. As a result of the smaller surface area and reduced volume, the generation and storage of energy in small satellites have limitations, which drives the industry and the scientific community to find ways to improve the quality of service (QoS). In this context, this research presents a multi-satellite mission planning tool, consisting of a Mixed Integer Programming (MIP) formulation, which models the main characteristics and difficulties of this type of mission through restrictions of: energy management; and tasks with dynamic priorities, initialization amounts, execution time, in addition to the possibility of simultaneous or redundant execution on multiple satellites. The model considers two main types of tasks: collective tasks, which can be performed by any satellite, and individual tasks, targeting a single satellite. Based on this division and the state-of-the-art on multi-objective optimization, the formulation allows the analysis of the Pareto frontier, which enables the evaluation of the trade-off between the QoS of the constellation and the QoS of the individual tasks. Different scenarios were simulated, considering different amounts of satellite, multi-objective models, and stimulated redundancy, which reinforced the vast applicability and adaptability of the model to different requirements. The results revealed an exponential relationship between the resolution time as a function of the number of satellites, this relationship is more accentuated when considering, in the objective function, the redundancy term. Even so, all scenarios were solved faster than the orbit duration, the longest duration being approximately 20 minutes in the simulation of a constellation with 5 satellites, 96 minutes orbit, 20 individual tasks and 5 collective tasks with stimulated redundancy. Furthermore, it was observed that the stimulus of redundant execution of collective tasks does not exert a significant influence on the collective or individual QoS. It is understood that the results presented enable the model to be used as a decision-making tool for operators of multi-satellite missions.

Keywords: Optimization. Small satellites. Constellations. Task scheduling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – FloripaSat-I, o CubeSat 1U desenvolvido na UFSC e lançado em 2019.....	15
Figura 2 – Representação do enquadramento de CubeSats em diferentes categorias de satélites	16
Figura 3 – Deployers comerciais para CubeSats de 1U, 2U, 3U, 6U e 12U.....	16
Figura 4 – Representação de fronteiras de Pareto de maximização e minimização para um problema com dois objetivos (A e B) e conjunto de soluções factíveis convexo	22
Figura 5 – Exemplo ilustrativo do método ϵ -constraint tradicional	24
Figura 6 – Diagrama de blocos simplificado do modelo desenvolvido e sua integração com os modelos auxiliares e o ambiente de resolução (solver).....	30
Figura 7 – Representação gráfica dos subconjuntos de tarefas	31
Figura 8 – Variáveis auxiliares ϕ e α	34
Figura 9 – Representação da fronteira de Pareto para um problema com dois objetivos (A e B)	38
Figura 10 – Fluxograma representativo da aplicação do método ϵ -constraint modificado para a obtenção de um conjunto de pontos Pareto-ótimos	39
Figura 11 – Ilustração da defasagem orbital adotada (no exemplo, $S = 4$).....	42
Figura 12 – Resultados do cenário Cnr1.1. (a, c) Escalonamentos ótimos e (b, d) balanços de energia dos satélites 1, 2.....	45
Figura 13 – Resultados do cenário Cnr1.2. QoS (individual e coletiva) e tempo de resolução em função da quantidade de satélites na constelação.....	46
Figura 14 – Resultado do cenário Cnr2.1. Fronteira de Pareto (A e B)	47
Figura 15 – Resultado do cenário Cnr2.1. Escalonamento ótimo dos satélites 1 (a) e 2 (b) quando as tarefas coletivas (A) são maximizadas	48
Figura 16 – Resultado do cenário Cnr2.1. Escalonamento ótimo dos satélites 1 (a) e 2 (b) quando as tarefas individuais (B) são maximizadas.....	48
Figura 17 – Resultado do cenário Cnr2.2. Fronteira de Pareto (A e B)	49
Figura 18 – Resultados do cenário Cnr3.1. (a, c) Escalonamentos ótimos e (b, d) balanços de energia dos satélites 1, 2.....	51
Figura 19 – Resultados do cenário Cnr3.3. QoS (individual, coletiva e redundante) e tempo de resolução em função do peso ωC	52

Figura 20 – Resultados do cenário Cnr3.3. QoS (individual, coletiva e redundante) e tempo de resolução em função da quantidade de satélites na constelação..... 53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Trabalhos relacionados (comparativo)	28
Quadro 2 – Conjuntos, subconjuntos e variáveis do modelo.	31
Quadro 3 – Entradas do modelo	32
Quadro 4 – Aparato utilizado na implementação	41
Quadro 5 – Parâmetros da órbita	42
Quadro 6 – Parâmetros de bateria	43
Quadro 7 – Limites utilizados na definição aleatória das propriedades das tarefas	43
Quadro 8 – Síntese da implementação Cnr1.1	44
Quadro 9 – Síntese da implementação Cnr1.2	45
Quadro 10 – Síntese da implementação Cnr2.1	47
Quadro 11 – Síntese da implementação Cnr2.2	49
Quadro 12 – Síntese da implementação Cnr3.1	50
Quadro 13 – Síntese da implementação Cnr3.2	51
Quadro 14 – Síntese da implementação Cnr3.3	52
Quadro 15 – Comparativo entre as abordagens.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
B&B	<i>Branch and Bound</i>
BIP	Programação Inteira Binária / <i>Binary Integer Programming</i>
Cal Poly	Universidade Politécnica Estadual da Califórnia
COTS	Componentes de prateleira / <i>Components off-the-shelf</i>
DM	Tomador de decisão / <i>Decision maker</i>
DT	Transferência de dados / <i>Data transfer</i>
EO	Observação da Terra / <i>Earth Observation</i>
EPS	Sistema elétrico de potência / <i>Electrical power system</i>
FF	<i>Formation-flying</i>
GDP	Generalized Disjunctive Program
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet das coisas / <i>Internet of Things</i>
IP	Programação Inteira / <i>Integer Programming</i>
LEO	Órbita terrestre baixa / <i>Low Earth orbit</i>
LP	Programação Linear / <i>Linear Programming</i>
M2M	Máquina-para-máquina / <i>Machine-to-Machine</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MIP	Programação Inteira-Mista / <i>Mixed-Integer Programming</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OM	Manutenção da órbita / <i>Orbital maintenance</i>
OR	Pesquisa Operacional / <i>Operations Research</i>
QoS	Qualidade de Serviço / <i>Quality of Service</i>
SoC	Estado de Carga / <i>State of Charge</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	<i>OBJETIVOS.....</i>	<i>14</i>
1.1.1	Geral	14
1.1.2	Específicos	14
1.2	<i>PUBLICAÇÕES.....</i>	<i>14</i>
1.3	<i>ORGANIZAÇÃO.....</i>	<i>14</i>
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: SMALLSATS E CUBESATS	15
2.1	<i>PADRÃO CUBESAT</i>	<i>15</i>
2.2	<i>O PROBLEMA DA CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM PEQUENOS SATÉLITES.....</i>	<i>17</i>
2.3	<i>CONSTELAÇÕES</i>	<i>18</i>
2.4	<i>CONSIDERAÇÕES.....</i>	<i>19</i>
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: OTIMIZAÇÃO	20
3.1	<i>DEFINIÇÕES.....</i>	<i>20</i>
3.1.1	Programação linear	20
3.1.2	Programação inteira e inteira-mista.....	21
3.1.3	Problemas multiobjetivo e o conceito de “ótimo de Pareto”	21
3.2	<i>APLICAÇÕES: TASK SCHEDULING COMO SOLUÇÃO À OTIMIZAÇÃO DE MISSÕES ESPACIAIS.....</i>	<i>26</i>
4	MODELO PROPOSTO	29
4.1	<i>MODELO AUXILIAR: IRRADIAÇÃO (CUBESATS)</i>	<i>29</i>
4.2	<i>MODELO DESENVOLVIDO.....</i>	<i>29</i>
4.2.1	Notação	30
4.2.2	Objetivos.....	32
4.2.3	Restrições	33
4.2.4	Implementação da fronteira de Pareto.....	37
4.2.5	Síntese.....	39
5	RESULTADOS.....	41
5.1	<i>SOMENTE A E B, SEM ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO (CNR1)</i>	<i>43</i>
5.1.1	Exemplo inicial ilustrativo (Cnr1.1)	43
5.1.2	Variação do tamanho da constelação (Cnr1.2).....	45
5.2	<i>SOMENTE A E B, COM ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO (CNR2).....</i>	<i>46</i>
5.2.1	Constelação de dois satélites (Cnr2.1)	46

5.2.2	Constelação de três satélites (Cnr2.2)	49
5.3	<i>A, B E C, SEM ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO (CNR3)</i>	49
5.3.1	Exemplo inicial ilustrativo (Cnr3.1)	50
5.3.2	Variação no peso da redundância encorajada (Cnr3.2)	51
5.3.3	Variação do tamanho da constelação (Cnr3.3)	52
5.4	<i>CONSIDERAÇÕES</i>	53
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A tendência de miniaturização, conhecida pela popularização dos eletrônicos portáteis, atinge setores além daqueles observáveis cotidianamente. É o caso do setor aeroespacial, cujo momento no qual se encontra é conhecido como *New Space*. Esta “nova era” é marcada pela redução significativa do investimento necessário para se ter acesso ao espaço. Além de menores, alguns satélites modernos possuem estrutura e componentes padronizados, podendo, inclusive, ser totalmente construídos com componentes comerciais.

Neste cenário, o padrão CubeSat (CAL POLY SLO e JOHNSTONE, 2020), que surgiu como um experimento acadêmico, viu nas últimas duas décadas um crescimento expressivo de popularidade, tanto com relação às aplicações educacionais quanto às comerciais. Os CubeSats já se fazem presentes nas universidades brasileiras, como no laboratório SpaceLab da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que lançou, em 2019, o FloripaSat-1 (MARCELINO, MORSCH FILHO, *et al.*, 2021) e, em 2022, segue desenvolvendo o segundo CubeSat, desta vez de tamanho 2U, no âmbito de cooperação tecnológica com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Agência Espacial Brasileira (AEB).

Percebeu-se, também, nos pequenos satélites, a possibilidade de aplicação em conjunto, por meio de missões multi-satélite, as chamadas constelações. A atratividade das constelações pode ser explicada através de uma analogia com redes de sensores sem fio (MARTINCIC e SCHWIEBERT, 2005). Sensores de baixo custo e baixo consumo de energia, individualmente, são inferiores a sensores de ponta com consumo elevado; entretanto, quando utilizados em rede, pequenos sensores sem fio possuem uma alta capacidade de monitoramento. Com constelações de pequenos satélites, o poder de aferir ou transmitir dados de diversos pontos distintos, de forma simultânea, desperta atenção devido ao elevado potencial científico. No estado de Santa Catarina, a missão de múltiplos CubeSats, Constelação Catarina, está sendo desenvolvida para atender, prioritariamente, demandas dos setores nacionais de agropecuária e defesa civil.

Mesmo com o sucesso das constelações de pequenos satélites, existem alguns desafios inerentes ao pequeno volume e pouca área superficial destes. Devido às dimensões reduzidas, a geração e armazenamento de energia – comumente realizados usando-se painéis solares e baterias, respectivamente – possuem limitações e, portanto, são fatores de vultuosa importância numa missão espacial. Neste viés, esta pesquisa propõe uma solução de aplicabilidade abrangente, capaz de melhorar o aproveitamento da missão por meio da maximização da qualidade de serviço. A solução proposta faz uso de escalonamento de tarefas como ferramenta de planejamento e otimização de missões multi-satélite (constelações). Em alinhamento com Rigo *et al.* (2021), este trabalho apresenta um modelo discreto, *offline*, orientado a energia disponível, apto a fornecer ao tomador de decisões uma análise multiobjetivo que pondera entre a realização de tarefas coletivas da constelação e tarefas individuais de cada satélite.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Desenvolver um modelo de otimização que permita o escalonamento ótimo de tarefas em uma constelação de pequenos satélites, levando em conta o *trade-off* entre tarefas individuais e coletivas.

1.1.2 Específicos

Identificar e reconhecer os problemas inerentes ao escalonamento de tarefas orientado a energia disponível em pequenos satélites, bem como o estado-da-arte.

Aplicar métodos de otimização multiobjetivo na resolução do problema de escalonamento de tarefas em constelação de pequenos satélites.

Analisar os resultados encontrados na otimização aplicada, bem como o *trade-off* entre as tarefas individuais e coletivas da constelação.

1.2 PUBLICAÇÕES

Esta pesquisa gerou publicação no periódico *Sensors* (MDPI), com apoio da Agência Espacial Brasileira:

SEMAN, L.O.; RIBEIRO, B.F.; RIGO, C.A.; FILHO, E.M.; CAMPONOGARA, E.; LEONARDI, R.; BEZERRA, E.A. An Energy-Aware Task Scheduling for Quality-of-Service Assurance in Constellations of Nanosatellites. *Sensors*. 22(10), 3715. 2022.
<https://doi.org/10.3390/s22103715>

1.3 ORGANIZAÇÃO

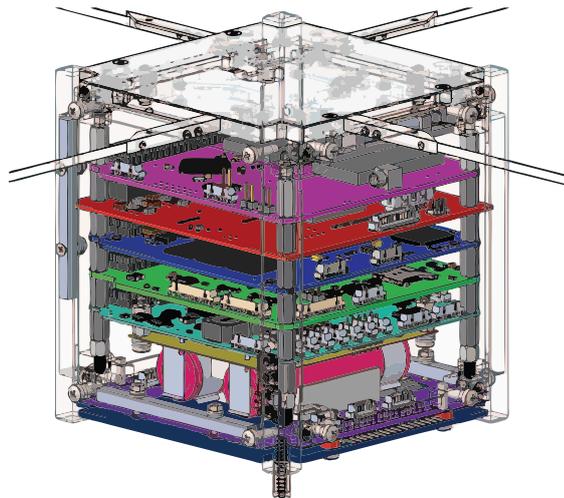
Este trabalho é dividido nos seguintes capítulos: o Capítulo 2 discute acerca de pequenos satélites e CubeSats, são apresentadas descrições e dados quantitativos que permitem ao leitor compreender o cenário, mais especificamente no que concerne à esfera da ciência aeroespacial, no qual se insere este trabalho; o Capítulo 3 traz conceitos em programação linear e otimização a fim de fornecer o arcabouço necessário para a compreensão do modelo proposto, que é apresentado logo em seguida, em detalhes, no Capítulo 4; no Capítulo 5, cenários e resultados de simulações são exibidos e discutidos, dispondo diversas análises sobre diferentes aspectos e propriedades do modelo; por fim, o Capítulo 6 manifesta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: *SMALLSATS* E *CUBESATS*

Ao longo dos anos, a definição do conceito de *SmallSats* passou por alterações. No início dos anos 1970, a NASA inaugurou a categoria com o lançamento das sondas espaciais *Pioneer 10* e *11*, que pesavam menos de 600 kg cada. No último relatório disponibilizado pelo Centro de Pesquisas Ames – afiliado da NASA –, em outubro de 2021, sobre o estado-da-arte em tecnologias para sistemas de pequenos veículos espaciais, a categoria *SmallSats* ou *small satellites* teve seu peso máximo definido como 180 kg. Nessa definição, os *SmallSats* englobam as categorias: minissatélites (100 a 180 kg), microssatélites (10 – 100 kg), nanosatélites (1 – 10 kg), picosatélites (0,1 – 1 kg) e femtosatélites (0,01 – 0,09 kg) (NASA, 2021). Tal modificação na definição da categoria de *SmallSats* evidencia o encaminhamento da tecnologia espacial no sentido da miniaturização, que atinge, também, o setor de eletrônicos de maneira geral. Os satélites modernos conseguem entregar um melhor desempenho científico com tamanho reduzido, dessa forma, mostram-se vantajosos, pois requerem menos tempo de produção, recursos humanos e financeiros (SHKOLNIK, 2018; POGHOSYAN e GOLKAR, 2017).

2.1 PADRÃO CUBESAT

Figura 1 – FloripaSat-I, o CubeSat 1U desenvolvido na UFSC e lançado em 2019



Fonte: Marcelino *et al.*, 2020.

Além da miniaturização, a tendência de padronização mostra-se impactante na redução de custos associados ao desenvolvimento e lançamento de satélites. Nesse contexto, foi criado, em 1999, pela Universidade Politécnica Estadual da Califórnia (*Cal Poly*), o padrão CubeSat, cuja unidade é denominada “U”. Um CubeSat 1U (Figura 1) possui formato cúbico com 10 cm de aresta e massa igual ou inferior a 2 kg (CAL POLY SLO e JOHNSTONE, 2020). Unidades de *CubeSat* podem ser combinadas para formar um único satélite de até 30 kg. Portanto, a depender da massa total, um *CubeSat* pode se enquadrar em diferentes categorias, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Representação do enquadramento de CubeSats em diferentes categorias de satélites



Fonte: Autoria própria.

Em função de suas dimensões reduzidas e padronizadas, a fabricação em massa e a produção de partes e componentes *off-the-shelf* (COTS) – de prateleira, comercialmente disponíveis – tornou-se uma realidade para CubeSats. Além disso, os custos de transporte e lançamento foram reduzidos significativamente, especialmente devido à disponibilidade comercial de *dispensers/deployers* (Figura 3) que fazem a interface do satélite com o veículo de lançamento (NASA, 2017; CAL POLY SLO e JOHNSTONE, 2020).

Figura 3 – Deployers comerciais para CubeSats de 1U, 2U, 3U, 6U e 12U



Fonte: ISIS – Innovative Solutions in Space, 2021.

Em 2019, seguindo um movimento de crescimento em comparação com os anos anteriores, *SmallSats* representaram cerca de 80% de todos os satélites lançados, destes, mais de 40% foram CubeSats. Além disso, os *SmallSats* lançados para aplicações comerciais saltaram de 6% em 2012 para 62% em 2019, o que evidencia o potencial atrativo e vasta aplicabilidade dos satélites de menor porte (BRYCE SPACE AND TECHNOLOGY, 2020; SPACEWORKS ENTERPRISES, 2020).

A nova era espacial, ou “New Space”, é marcada pela maior acessibilidade ao espaço. Nela, atividades e pesquisas aeroespaciais deixam de ser exclusividade de um grupo seleto de países e empresas e passam a ser uma realidade alcançável por diversos países e instituições, incluindo escolas e universidades. O padrão CubeSat, que, em sua origem, sequer tinha intuito de se tornar um padrão, é tido como elemento chave para esta nova (atual) realidade (CAMPS,

2019). O progresso científico foi impulsionado pela possibilidade de testar, por meio de missões com CubeSats, conceitos que, antes, dispunham de grandes barreiras entre teoria e prática.

2.2 O PROBLEMA DA CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM PEQUENOS SATÉLITES

O projeto de um CubeSat é limitado em dimensões, peso e, tipicamente, custos. Além disso, missões com *SmallSats* costumam apresentar menor duração em comparação com missões com satélites de maior porte. Diante dessas restrições, o projeto de um dos maiores e mais pesados subsistemas em um CubeSat¹, o *electrical power system* (EPS), responsável pela captação, armazenamento e distribuição de energia no satélite, torna-se bastante complexo. Normalmente, o EPS é projetado para apresentar uma boa relação custo-eficiência, portanto, costuma-se utilizar COTS – ao invés de componentes específicos para aplicação espacial –, células solares e baterias recarregáveis, estando os dois últimos presentes em cerca de 85% dos nanosatélites (NASA, 2021).

Dentre as tecnologias disponíveis, destacam-se as células solares de tripla junção, que são vastamente utilizadas na indústria aeroespacial por oferecerem uma boa eficiência – em torno de 30% – na captação de energia, com boas relações de custo-eficiência e massa-potência (LI, AIERKEN, *et al.*, 2021). As células solares podem ser dispostas sob a superfície do corpo CubeSat ou podem ser estendidas (*deployed*) após o lançamento em órbita. Este segundo caso, por elevar potencialmente os riscos, custos, complexidade da construção e do controle de atitude, é menos utilizado, sendo aplicado somente em alguns casos de CubeSats que carecem de mais energia.

A estrutura de captação de energia precisa ser projetada para suportar elevada exposição à radiação e grande amplitude térmica, pois as órbitas usualmente são compostas por períodos de exposição ao sol e períodos sem exposição (eclipse). Apesar de possuírem custo muito superior, por metro quadrado, em comparação com os módulos geradores de energia solar fotovoltaica utilizados em Terra – que são feitos com silício e possuem eficiência em torno de 20%² –, devido à menor área necessária para este tipo de aplicação espacial (pequenos satélites), o emprego de tal tecnologia mais complexa não implica em ônus ao custo da missão.

A duração da missão também influi na escolha dos componentes e tecnologias a serem adotadas na construção do satélite. No que diz respeito ao EPS, além de determinar a complexidade da estrutura de captação/geração de energia, este fator está fortemente relacionando ao tipo de bateria selecionado. Baterias de tipo primário (não recarregáveis) são tipicamente usadas em missões de menor duração; já as de tipo secundário (recarregáveis) são empregadas em missões mais duradouras, associadas a um fornecimento primário de energia (usualmente células solares) (NASA, 2021).

¹ Apesar de haver uma distinção conceitual entre os termos *SmallSats* e *CubeSats*, ambos são utilizados de forma indistinguível em alguns trechos desta pesquisa. Exceto quando explicitamente informado ou quando apresentados dados quantitativos específicos, considera-se que, dentro do escopo desta pesquisa, as mesmas características e particularidades se aplicam a ambos.

² Fonte: Datasheets de módulos fotovoltaicos das marcas Canadian Solar (disponível em: <https://www.csisolar.com/br/downloads/>), Trina Solar (disponível em: <https://www.trinasolar.com/pt/product>) e LG (disponível em: <https://www.lg.com/us/solar>). Acesso em: janeiro de 2022.

Com a popularização, na última década, dos *SmallSats* – e CubeSats –, o setor aeroespacial passa a conviver com fortes demandas por miniaturização e desenvolvimento de novas tecnologias acessíveis de captação e armazenamento de energia. A maior tolerância a risco e o apreço por soluções não onerosas impulsiona a indústria e a comunidade científica ao encontro de ferramentas capazes de aprimorar a qualidade de serviço e o valor das missões espaciais, seja por meio do melhoramento a nível de hardware, de software ou de ações de planejamento que possibilitem a entrega de resultados superiores sem que haja necessidade de realizar alterações no projeto.

2.3 CONSTELAÇÕES

Acompanhando a tendência dos *SmallSats*, as missões com múltiplos satélites, denominadas constelações, têm se popularizado e sido notadas como ferramentas com elevado potencial de aplicação na exploração do espaço, coleta de dados ambientais, composição de infraestrutura de comunicação, dentre outras áreas. Tal concepção deve-se à capacidade que constelações possuem de cobrir grandes áreas e coletar dados de diversos pontos, com equipamentos semelhantes e de forma simultânea. Além disso, as missões com múltiplos satélites conseguem conferir maior flexibilidade e confiabilidade em comparação com missões de um único satélite (NASA, 2021). No que tange o padrão CubeSat, as constelações já representam 50% dos mais de 1500 CubeSats lançados desde o surgimento deste (SWARTWOUT, 2019).

Missões com múltiplos satélites também podem ser referidas como *Formation-flying* (FF), entretanto, não se trata de termo sinônimo de *constelação*. Em FFs, há um rigor com relação a posição dos satélites, sendo necessária a existência de um sistema de propulsão ativo e de acoplamento por uma mesma lei de controle, no qual o estado de um satélite é influenciado pelo estado de outro(s). Uma constelação pode ou não possuir sistema de propulsão ativo³. De maneira geral, poucas aplicações requerem um FF, sendo uma constelação tipicamente suficiente para atender a todos os requisitos. FFs, portanto, costumam ser aplicados para fins de demonstração tecnológica ou em missões de alta complexidade, como as interplanetárias (BANDYOPADHYAY, FOUST, et al., 2016; CAMPS, 2019).

Dentre as aplicações comerciais mais populares das constelações de *SmallSats*, conforme levantamento de Camps (2019), estão: observação terrestre (*Earth Observation/EO*) – incluindo atividades de monitoramento de desastres –; coleta de dados meteorológicos; e comunicações – incluindo serviços relacionados à internet das coisas (*Internet of Things/IoT*) e máquina-para-máquina (*Machine-to-Machine/M2M*).

No Brasil, em maio de 2021, foi criado, pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), em parceria com a Agência Espacial Brasileira (AEB), o programa Constelação Catarina⁴. O programa, ainda em curso, tem como objetivo fomentar o desenvolvimento da indústria espacial no Estado de Santa Catarina e em outros estados que venham a participar direta ou indiretamente do desenvolvimento das pesquisas e produtos relacionados à constelação. São responsáveis pela evolução do projeto instituições públicas e

³ FFs e as diferentes classificações de constelações não são alvos de maior minúcia por tratar-se de tópicos cuja compreensão aprofundada é pouco relevante para a aplicação discutida nesta pesquisa.

⁴Através da portaria nº 590, publicada em 6 de maio de 2021 no Diário Oficial da União.

privadas já integrantes do, ou que venham a aderir ao, Consórcio Catarina. O conjunto de CubeSats que integrará a Constelação Catarina atenderá, prioritariamente, a demandas dos setores agropecuário e de defesa civil do país.

2.4 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo apresentou dados e informações acerca do atual cenário de exploração espacial no que diz respeito à popularização dos satélites de pequeno porte, em especial, CubeSats. Foram ressaltados os desafios inerentes ao tamanho reduzido destes sistemas, com enfoque nas limitações de coleta e armazenamento de energia; as perspectivas de aplicações comerciais, científicas e educacionais; e o potencial das constelações. Ilustrar este contexto evidencia a relevância do desenvolvimento de metodologias e ferramentas voltadas para o aprimoramento da qualidade de serviço em missões multi-satélite.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: OTIMIZAÇÃO

A análise interdisciplinar associada à aplicação de métodos e modelos matemáticos a problemas reais envolvendo recursos escassos é referida, no meio científico, como pesquisa operacional (*Operations Research/OR*). OR está fortemente relacionada à otimização de sistemas, por meio de ferramentas científicas e computacionais, visando elucidar problemas complexos de maneira a auxiliar tomadas de decisões (RAVINDRAN, 2008). Na esfera aeroespacial, OR é uma ferramenta relevante para o alcance de resultados ótimos através do planejamento de missões, conforme exprime esta pesquisa.

Este capítulo, em sua primeira Seção (3.1), pontua e define alguns conceitos em OR importantes para a compreensão do modelo multiobjetivo apresentado neste trabalho. A segunda Seção (3.2), discute outras pesquisas envolvendo otimização aplicada a pequenos satélites.

3.1 DEFINIÇÕES

Dentre as principais definições apresentadas, estão: programação linear (*Linear Programming/LP*), programação inteira (*Integer Programming/IP*), métodos de resolução de problemas de otimização multiobjetivo, e outros conceitos derivados. O conteúdo expresso nos tópicos 3.1.1 e 3.1.2 tem respaldo nas obras científicas *Linear Programming: Foundations and Extensions* (VANDERBEI, 2014) e *Integer Programming* (WOLSEY, 2020).

3.1.1 Programação linear

Modelos baseados em equações/inequações lineares são utilizados para representar situações reais desde centenas de anos atrás (MURTY, 2008). Tais modelos podem ser resolvidos através de programação linear (LP), que está fortemente relacionada ao conceito de otimização restrita (*constrained optimization*), na qual uma função deve ser maximizada ou minimizada respeitando limites estabelecidos. Em LP, a função a ser maximizada (ou minimizada), bem como as restrições do problema, são necessariamente lineares.

As expressões (1.a)-(1.c) exemplificam um problema de programação linear. No problema ilustrativo, F_1 é a **função objetivo**, da qual se deseja obter o valor máximo; $x_j (\in \mathbb{R})$ são as **variáveis de decisão**, determinadas com a resolução do problema – caso o problema seja **factível**, isto é, caso haja pelo menos uma solução que satisfaça todas as restrições –; as expressões (1.b)-(1.c) representam as **restrições** do problema, usualmente expressas através de inequações com sinais de menor ou igual (\leq); $a_{ij}, b_i, c_j (\in \mathbb{R})$ são constantes.

$$\text{maximizar: } F_1 = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1.a)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.b)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1.c)$$

Para que o problema seja considerado **factível** e **delimitado**, ou seja, possua uma solução ótima, faz-se necessário que as restrições não possuam contradições e sejam capazes de delimitar o conjunto de soluções admissíveis de forma a impedir que a função objetivo cresça livremente. A junção das restrições forma um poliedro e a região por ele contida representa o conjunto de soluções admissíveis. A solução ótima do problema estará em um dos vértices do

poliedro. Problemas de LP podem ser resolvidos pelo método **simplex**, que percorre os limites da região de soluções admissíveis até que a solução ótima seja encontrada.

3.1.2 Programação inteira e inteira-mista

Programação inteira (IP) trata de problemas de otimização nos quais há restrições que limitam as variáveis a assumirem somente valores inteiros. Caso a restrição não se aplique à totalidade das variáveis, podendo algumas destas assumirem valores reais, trata-se de um problema de programação inteira-mista (*Mixed Integer Programming/MIP*).

A solução ótima para um problema de IP pode ser encontrada através do método *branch and bound* (B&B), que explora as possíveis soluções percorrendo uma árvore e descartando ramos (*branches*) conforme as soluções candidatas vão sendo testadas. À medida que a árvore é percorrida, limites superiores e inferiores (*bounds*) são estabelecidos, até que se encontre a solução final.

Muitos otimizadores comerciais adotam, para a resolução de problemas de MIP, combinações entre o método exato B&B e técnicas adicionais, como heurísticas, que ajudam a limitar o tamanho da árvore, reduzindo as soluções a serem exploradas e contribuindo para uma convergência mais rápida à solução ótima.

3.1.3 Problemas multiobjetivo e o conceito de “ótimo de Pareto”

Conforme referido no item 3.1.1, um problema de LP possui uma função objetivo (1.a), cujo valor deve ser maximizado (ou minimizado). Entretanto, alguns problemas reais não conseguem ser inteiramente representados por meio deste tipo de formulação – de objetivo único e, consequentemente, solução única.

Em várias esferas de aplicação de otimização, existem casos nos quais deseja-se atingir mais de um objetivo e, geralmente, uma parcela ou a totalidade dos objetivos são conflitantes (NGATCHOU, ZAREI e EL-SHARKAWI, 2005). Este tipo de problema, denominado **multiobjetivo**, possui, como forma geral, o conjunto de expressões (2), no qual: $F(x)$ é o vetor de k funções objetivo (2.a); $g_i(x)$ são as m restrições (2.b); x é uma variável n -dimensional – $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ –, pertencente ao conjunto de soluções factíveis \mathcal{X} (2.c).

$$\text{maximizar: } F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \quad (2.a)$$

$$\text{sujeito a: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.b)$$

$$x \in \mathcal{X} \quad (2.c)$$

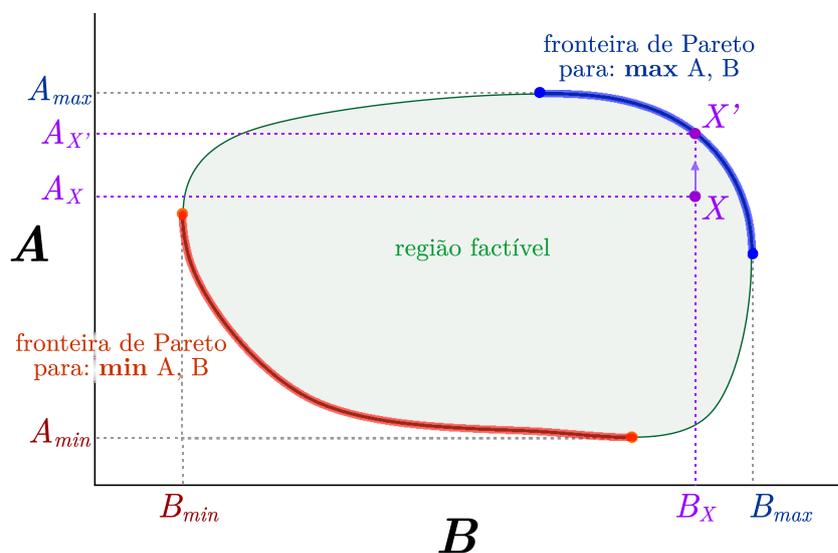
Atribui-se a Vilfredo Pareto, economista italiano, a primeira menção referenciável a situações envolvendo objetivos conflitantes, feita na obra *Cours d'Économie Politique*, de 1896. No livro, Pareto trata de uma situação socioeconômica, na qual considera um grupo de indivíduos vivendo em posições nas quais todos desfrutam de uma máxima *ofelividade*⁵. Neste cenário, Pareto aponta que, caso um indivíduo encontre uma forma de mudar de posição, seja alcançando mais ou menos ofelividade para si, os demais indivíduos serão afetados, positivamente ou negativamente (EHRGOTT, 2005). Este movimento, no qual o

⁵ Do francês *ophélimité*, palavra criada pelo economista para se referir à satisfação gerada por bem(ns) material(is) (MICHAELIS, 2015). No contexto em que se apresenta, pode ser considerado sinônimo de “conforto material/financeiro”.

aprimoramento de um objetivo (no exemplo, a ofelimidade de um indivíduo) provoca degradação de outro(s) objetivo(s), é tratado como um *trade-off*, ou seja, uma compensação.

A observação de Pareto acerca de objetivos conflitantes e *trade-off* foi notada por outras esferas científicas além dos estudos de economia. Desta forma, o nome do economista passou a ser vinculado aos conceitos e definições que surgiram posteriormente neste tema, especialmente em otimização multiobjetivo. Faz-se relevante, nesta pesquisa, apresentar as **principais definições em otimização de Pareto**. Além disso, para fins ilustrativos, são feitas elucidacões por meio de alusões ao problema ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Representação de fronteiras de Pareto de maximização e minimização para um problema com dois objetivos (A e B) e conjunto de soluções factíveis convexo



Fonte: Adaptado de Ngatchou, Zarei e El-Sharkawi, 2005.

Dominância de Pareto ocorre entre soluções factíveis quando uma solução $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é **dominada** por uma solução $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, quando $F(x') = [f_1(x'), f_2(x'), \dots, f_k(x')]$ é superior (considerando um problema de maximização) a $F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]$ para pelo menos um objetivo $f_d(x') > f_d(x)$, e é o mesmo para pelo menos um objetivo $f_e(x') = f_e(x)$, sem que haja piora em nenhum dos objetivos. No exemplo da Figura 4, o ponto X' representa uma solução dominante sobre a do ponto X , pois, apesar de ambos possuírem o mesmo valor com relação ao objetivo B , $A_{X'} > A_X$, ou seja, houve um aprimoramento no objetivo A , o que torna $F(x') > F(x)$.

Uma solução x' é considerada **ótima de Pareto** se, e somente se, não existe uma solução $x \in X$ que exerça dominância sobre ela, ou seja, $F(x') \geq F(x)$. No problema ilustrativo (Figura 4), X' é um ponto ótimo de Pareto, pois, não existem soluções que incrementem um dos objetivos sem decrementarem outro.

Conforme já citado, problemas multiobjetivo possuem múltiplas soluções, visto que há diversos pontos ótimos de Pareto. No exemplo (Figura 4), os pontos A_{max} e B_{max} são, assim como o ponto X' , parte do **conjunto ótimo de Pareto**, cujos elementos são todas as soluções consideradas ótimas de Pareto.

O universo de soluções factíveis pode ser graficamente representado em função dos objetivos, conforme ilustra a Figura 4. Nela, o eixo vertical representa o objetivo A e o eixo horizontal representa o objetivo B ; os pontos da linha traçada em azul correspondem à **fronteira de Pareto**, isto é, uma representação gráfica do conjunto ótimo de Pareto considerando a maximização de ambos os objetivos. A fronteira de Pareto referente à minimização dos objetivos, dadas as mesmas restrições, é representada pela linha vermelha. Trata-se, portanto, de uma ferramenta capaz de revelar ao tomador de decisões todas as soluções ótimas, permitindo uma avaliação consciente do cenário geral, uma análise dos *trade-offs* e, por fim, uma tomada de decisão bem fundamentada e compatível com os interesses deste.

Há diversos métodos de abordagem e resolução de problemas multiobjetivo, que podem ser classificados, quanto à forma de interação com o tomador de decisão (*Decision Maker/DM*), como: *a priori*, *iterativo*, ou *a posteriori*. Nos métodos classificados como *a priori*, faz-se necessário que o DM forneça informações sobre a solução desejada – como, por exemplo, preferência por um objetivo sobre outro – antes de o processo de resolução ser iniciado. Métodos interativos dialogam com o DM ao decorrer da resolução. Já os métodos tidos como *a posteriori* fornecem ao DM um cenário completo – contendo todas as soluções ótimas, ou uma representação adequada destas –, de forma que uma preferência dentre as possíveis soluções só precisa ser determinada *após* o processo de resolução (MAVROTAS, 2009).

Um dos métodos mais populares, utilizado na solução de problemas multiobjetivo, consiste na simplificação do problema, transformando-o em um problema de objetivo único, geralmente definindo-se pesos para os diversos objetivos; ou escolhendo-se um objetivo para ser maximizado/minimizado associada à transformação dos demais objetivos em restrições. Apesar da vasta utilização, este método possui limitações no que diz respeito à obtenção de somente uma solução, estando omissas análises e comparações entre outras soluções ótimas; e à possíveis dificuldades na obtenção da solução, especialmente em problemas maiores ou mais complexos, devido a necessidade de conhecimento prévio (*a priori*) sobre o espaço de soluções factíveis (NGATCHOU, ZAREI e EL-SHARKAWI, 2005).

A necessidade de algum conhecimento sobre o espaço de soluções, ou de preferências pré-estabelecidas, é inerente a todos os métodos *a posteriori*. Os métodos interativos, assim como os *a priori*, não fornecem ao DM uma visão ampla do cenário de soluções, além de demandarem disponibilidade constante ao decorrer do processo de resolução. Tendo em vista as desvantagens apresentadas para estas categorias, em contraposição à capacidade de métodos *a posteriori* de obter uma representação adequada do conjunto de soluções ótimas, foram explorados, nesta pesquisa, conceitos relativos à fronteira de Pareto e otimalidade de Pareto, que estão fortemente ligados, em geral, a problemas multiobjetivos, e ao método utilizado na formulação do modelo aqui proposto: ϵ -*constraint* modificado (MAVROTAS, 2009).

O método **ϵ -*constraint* tradicional**, proposto por Haimes *et al.* (1971 *apud* EHRGOTT, 2005), consiste em tratar um dos objetivos como função objetivo e os demais como restrições, reduzindo o problema original (2) a um com objetivo único (3).

$$\text{maximizar: } f_j(x) \tag{3.a}$$

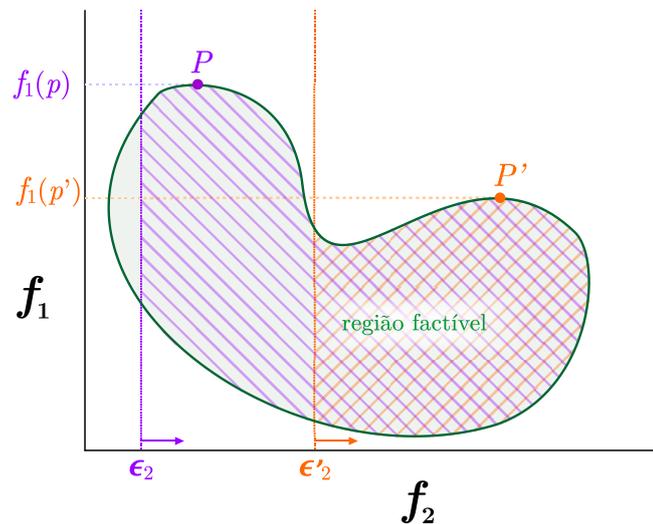
$$\text{sujeito a: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.b)$$

$$f_l(x) \geq \epsilon_l \quad l = 1, 2, \dots, k \quad l \neq j \quad (3.c)$$

$$x \in \mathcal{X} \quad (3.d)$$

Entretanto, a determinação dos valores de ϵ_l requerem algum conhecimento sobre o espaço de soluções ou obtenção por variação paramétrica, o que pode tornar excessivo o tempo e o esforço computacional despendidos na resolução do problema (COELLO, LAMONT e VELDHUIZEN, 2007). Além disso, para uma única iteração – única atribuição de valor a ϵ_l –, mesmo que uma solução seja encontrada, não há total garantia de que ela seja ótima (global), pois as restrições 3.c limitam o espaço de busca pela solução, conforme ilustra o exemplo da Figura 5. Nele, o ponto P' seria apontado como solução ótima na maximização do objetivo f_1 , caso fosse definida a restrição $f_2(x) \geq \epsilon'_2$. Caso a restrição fosse definida como $f_2(x) \geq \epsilon_2$, o ponto ótimo P seria identificado.

Figura 5 – Exemplo ilustrativo do método ϵ -constraint tradicional



Fonte: Adaptado de Ehrgott, 2005.

Uma versão modificada do método ϵ -constraint, proposta por Mavrotas (2009), resolve os principais pontos negativos do método original. O **método ϵ -constraint ampliado** (*augmented ϵ -constraint method/AUGMECON*) é capaz de fornecer a fronteira de Pareto de um problema, com garantia de que todas as soluções encontradas são ótimas de Pareto, que não podem ser dominadas por outras soluções. O método inicia a partir da **otimização lexicográfica** de cada objetivo individualmente. Para obter a otimização lexicográfica relativa ao objetivo f_1 , por exemplo, os problemas (4), (5), ..., (6) são resolvidos, resultando em: $\text{lexmax}(f_1) = (U_1, U_2, \dots, U_k)$.

$$U_1 = \max f_1(x) \quad (4.a)$$

$$\text{sujeito a: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.b)$$

$$x \in \mathcal{X} \quad (4.c)$$

$$U_2 = \max f_2(x) \quad (5.a)$$

$$\text{sujeito a: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.b)$$

$$f_1(x) = U_1 \quad (5.c)$$

$$x \in \mathcal{X} \quad (5.d)$$

⋮

$$U_k = \max f_k(x) \quad (6.a)$$

$$\text{sujeito a: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6.b)$$

$$f_1(x) = U_1 \quad (6.c)$$

$$f_2(x) = U_2 \quad (6.d)$$

⋮

$$f_{k-1}(x) = U_{k-1} \quad (6.e)$$

$$x \in \mathcal{X} \quad (6.f)$$

O processo de otimização lexicográfica é repetido para todos os k objetivos, formando a chamada tabela *payoff* (*payoff table*) do problema. A partir da tabela *payoff*, a variação (*range*) de cada objetivo –, ou seja, a diferença (r_l) entre o valor máximo U_l e o mínimo L_l que cada objetivo f_l pode assumir (7.d) – é determinada. A tabela *payoff* é composta pelas soluções ótimas de Pareto extremas do problema; para obter a fronteira de Pareto com uma resolução de p_l pontos para cada objetivo l (com $l = 2, 3, \dots, k$), o problema (7) é resolvido sucessivamente, variando-se cada índice i_l de 1 a p_l . Nele, m é um número muito pequeno, da ordem de 10^{-6} a 10^{-3} ; ϵ_l é uma variável de folga, que, ao ser maximizada e somada a f_l no cálculo de $f_l(x)$ – em (7.f) –, garante que a solução encontrada seja ótima de Pareto.

$$\text{maximizar: } f_1(x) + m(\epsilon_2/r_2 + \epsilon_3/r_3 + \dots + \epsilon_k/r_k) \quad (7.a)$$

$$\text{sujeito a: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7.b)$$

$$f_l(x) = f_l + \epsilon_l \quad l = 2, 3, \dots, k \quad (7.c)$$

$$\text{onde: } r_l = U_l - L_l \quad (7.d)$$

$$f_l = L_l + (i_l \cdot r_l)/p_l \quad (7.f)$$

A garantia de que todos os pontos obtidos pelo método AUGMECON (MAVROTAS, 2009) não podem ser superados por outras soluções pode ser provada: supondo uma solução $x' = (u_1, f_2 + \epsilon'_2, \dots, f_k + \epsilon'_k)$, que seja dominante sobre a solução encontrada pelo método $x = (u_1, f_2 + \epsilon_2, \dots, f_k + \epsilon_k)$. Haveria, portanto, pelo menos um objetivo com resultado superior, conforme descrevem (8.a) e (8.b).

$$f_l + \epsilon'_l \geq f_l + \epsilon_l \quad l = 2, 3, \dots, k \quad (8.a)$$

$$\sum_{l=2}^k \epsilon'_l > \sum_{l=2}^k \epsilon_l \quad (8.b)$$

Entretanto, (8.b) não pode ser uma afirmação verdadeira, pois ela contradiz a função objetivo em (7.a), que maximiza os índices ϵ_l . Neste sentido, não há como existir uma solução que produza (8.b), por conseguinte, a solução x não pode ser superada por outra, ou seja, é ótima de Pareto.

3.2 APLICAÇÕES: *TASK SCHEDULING* COMO SOLUÇÃO À OTIMIZAÇÃO DE MISSÕES ESPACIAIS

Dentre as possíveis aplicações de programação inteira, os problemas de escalonamento (*scheduling*) destacam-se como parte das mais populares. Escalonamento tem como objetivo alocar recursos – sejam eles: tempo; máquinas; pessoas; energia etc. –, de maneira ótima, dentre tarefas (*tasks* ou *jobs*) concorrentes (HASAN e AREFIN, 2017).

No setor aeroespacial, o problema de escalonamento é abordado, quanto ao momento de execução da otimização, de duas formas: *online* e *offline*. O escalonamento *online* ocorre diretamente no satélite, e é constantemente atualizado conforme o aparecimento de novas tarefas; esta abordagem pode ser proveitosa em missões nas quais os satélites precisam lidar com o recebimento de solicitações (*requests*) por parte da estação terrestre. Para missões com tarefas pré-definidas – como diversas de observação terrestre, coleta de dados ambientais, experimentação acadêmica etc. –, a abordagem *offline* representa uma alternativa de baixo custo para o planejamento da missão, podendo melhorar a qualidade de serviço (*Quality of Service/QoS*) sem que sejam necessárias alterações no *software* ou *hardware* dos satélites.

Esta Seção apresentará pesquisas relacionadas à desenvolvida neste trabalho, a fim de caracterizar o estado-da-arte sobre escalonamento aplicado a missões multi-satélite. Para a súmula de cada pesquisa apresentada, são pontuados os aspectos a saber: principal objetivo ou campo de aplicação; se existem restrições quanto ao consumo de energia; como é abordada a dinâmica multi-satélite (se através de análise multiobjetivo ou não); qual o método utilizado na resolução do problema (se exato ou heurístico).

Missões destinadas à observação da Terra (*Earth Observation/EO*) aparecem modeladas com base no problema de escalonamento na pesquisa de Cui e Zhang (2019). Nesta formulação, voltada para o gerenciamento de satélites sob demandas emergenciais – como previsão e monitoramento de desastres naturais –, é proposto um modelo de escalonamento dinâmico *online*, orientado à prioridade, com restrições de energia, e capaz de lidar com a chegada de novas tarefas. São objetivos desta aplicação: a maximização do rendimento total da missão e a minimização do tempo de espera de missões que requerem execução urgente. Apesar de existirem dois objetivos definidos, estes são representados de forma simplificada, em uma única função objetivo. A solução do problema é obtida por meio de um algoritmo híbrido de busca tabu genética (*hybrid genetic tabu search*) – método heurístico.

Ainda no campo de EO, a pesquisa de He *et al.* (2019) apresenta uma formulação que considera influência de nuvens na captura de imagens. Trata-se de uma aplicação *online* – em tempo real –, com restrições de energia e com múltiplos objetivos não concorrentes, que são

tratados de forma hierárquica. Somente um objetivo é considerado por vez, resultando em uma única solução ótima. O método de resolução é heurístico, baseado no algoritmo de otimização por colônia de formigas (*ant colony optimization algorithm*).

Uma modelagem MIP *offline* é apresentada por Chen *et al.* (2019) para aplicação em EO, considerando janelas de visibilidade. São objetivos do problema: maximizar a quantidade de missões agendadas ou maximizar a soma dos pesos das missões concluídas. Não há análise multiobjetivo, visto que os objetivos são considerados separadamente. Há restrições que representam disponibilidade de recursos, entretanto, nesta pesquisa, recurso é definido como aparato de captura de imagem embarcado em um satélite. A solução é obtida por método exato, por meio de *solver* comercial.

Um algoritmo iterativo de otimização baseado em grafos é proposto por Jia *et al.* (2017) com o objetivo de melhor aproveitar o tempo limitado no qual há conexão entre a estação terrestre e o sistema multi-satélite. A proposta consiste em maximizar a transferência de dados (*data transfer/DT*) por meio do *download*, pelos satélites, de pacotes distintos de dados da estação terrestre, seguido do *offload* dentre os satélites da constelação. Quanto às restrições, apenas tempo de *download* e *offload* são considerados como recursos limitados; limitações de energia não são abordadas. Transferência de dados e uso de bateria foram otimizados no trabalho desenvolvido por Kørvell e Degn (2019); entretanto, a aplicabilidade é bastante restrita, visto que a formulação é direcionada especificamente à constelação dinamarquesa Ulloriaq.

Monmousseau (2021) apresenta um modelo MIP de escalonamento mais generalista, voltado para constelações de até trinta satélites de observação da Terra. O modelo inclui restrições de energia disponível baseadas no nível da bateria; esta, por sua vez, diretamente dependente do nível de energia nos painéis solares. A pesquisa propõe a resolução do modelo sem o uso de heurísticas. Os resultados são comparados aos de um modelo, com função similar, que faz o uso de um método meta-heurístico chamado *simulated annealing*. A pesquisa consegue obter soluções em um tempo competitivo através da redução do problema, por meio de pré-processamento, antes da fase de resolução.

O trabalho de Cho *et al.* (2018) desenvolve uma formulação de programação linear binária em tempo contínuo, de dois passos, para a maximização da métrica geral de desempenho de uma missão multi-satélite. Propõe-se que o modelo, que possui restrições de tempo e energia, e considera tarefas de transferência de dados (*download tasks*) e observação da Terra (*observation tasks*), tenha aplicabilidade abrangente e possa ser resolvido utilizando-se *solvers* comerciais. Apesar de serem definidos dois objetivos: a maximização dos dados baixados, e a maximização da soma dos pesos atribuídos às tarefas de observação; ambos são simplificados em uma única função através da atribuição de pesos.

O conceito de ótimo de Pareto é parte da pesquisa de Rocco, Souza e Prado (2003), que aborda o problema de manutenção da órbita (*orbital maintenance/OM*) em constelações simétricas associada ao mínimo consumo de combustível. Os autores propõem que os objetivos conflitantes sejam resolvidos através de um novo método, o qual denominam “critério de menor perda”. O método, fundamentado nos conceitos de otimalidade de Pareto, aponta que a solução ótima seja aquela com menor perda para todos os objetivos, sem que nenhum seja favorecido

ou desfavorecido. Como a situação-problema envolve gasto de combustível para a realização de manobras, não são feitas considerações acerca de consumo de energia elétrica.

O Quadro 1 apresenta um comparativo entre as pesquisas apresentadas nesta Seção, desenvolvidas por outros autores, e a proposta por este trabalho. A coluna de “Restrições de energia” considera restrições de bateria OU irradiação. Na coluna “Multiobjetivo”, são considerados problemas com objetivos conflitantes ou não. Em “Conjunto de soluções”, o trabalho é sinalizado se apresenta um conjunto de soluções ótimas, não uma solução única. Na coluna “Resolução”: “E” indica método exato e “H” indica heurístico.

Quadro 1 – Trabalhos relacionados (comparativo)

Pesquisa	Aplicação	Restrições de energia	Multiobjetivo	Conjunto de soluções	Resolução
(CUI e ZHANG, 2019)	EO	Sim	Sim	Não	H
(HE, LIU, <i>et al.</i> , 2019)	EO	Sim	Sim	Não	H
(CHEN, REINELT, <i>et al.</i> , 2019)	EO	Não	Não	Não	E
(JIA, LV, <i>et al.</i> , 2017)	DT	Não	Não	Não	H
(MONMOUSSEAU, 2021)	EO	Sim	Não	Não	E
(CHO, KIM, <i>et al.</i> , 2018)	EO/DT	Sim	Sim	Não	E
(ROCCO, SOUZA e PRADO, 2003)	OM	Não	Sim	Não	E
Este trabalho	Diversas	Sim	Sim	Sim	E

Fonte: Autoria própria.

O modelo proposto neste trabalho, portanto, destaca-se das demais formulações destinadas a missões multi-satélite por: apresentar aplicabilidade abrangente, ao não direcionar-se a um único campo de aplicação, como EO ou DT; considerar restrições de energia, contribuindo para o melhor proveito de missões envolvendo pequenos satélites; considerar múltiplos objetivos, permitindo, inclusive, a análise do *trade-off* entre diferentes tipos de tarefas ao gerar a fronteira de Pareto do problema, contendo, não apenas uma, mas um conjunto de soluções ótimas; ter resolução por métodos exatos, o que garante que as soluções encontradas sejam ótimas globais.

4 MODELO PROPOSTO

Este capítulo apresenta o modelo formulado para representar constelações de pequenos satélites e possibilitar a obtenção de escalonamento ótimo de tarefas. O intuito da formulação é possuir aplicabilidade abrangente, de forma a ser uma ferramenta de planejamento voltada para missões espaciais que se enquadrem no escopo proposto. O modelo, elaborado em um contexto de popularização das constelações de SmallSats e CubeSats, baseia-se na pesquisa desenvolvida por Rigo *et al.* (2021), que trata um único nanossatélite, estendendo-a ao encontro das especificidades de missões multi-satélite.

O modelo apresentado neste trabalho também engloba o conceito de otimização multiobjetivo ao gerar a fronteira de Pareto do problema, ilustrando como os recursos energéticos dos satélites podem ser distribuídos, de maneira ótima, entre as tarefas de constelação e as tarefas individuais.

Conforme frisado na Seção 2.2, uma grande maioria dos pequenos satélites possui células solares fotovoltaicas e baterias recarregáveis; neste sentido, além da formulação desenvolvida nesta pesquisa, este capítulo apresenta um modelo de irradiação (MORSCH FILHO, 2021) – específico para CubeSats –, que fornece a energia disponibilizada, ao decorrer da órbita especificada, a cada instante de tempo, pelos painéis solares fotovoltaicos que tipicamente compõem o EPS de um CubeSat. Também são apresentadas restrições que descrevem baterias recarregáveis (RIGO, SEMAN, *et al.*, 2021).

4.1 MODELO AUXILIAR: IRRADIAÇÃO (CUBESATS)

Um *framework* para simulação de irradiação e transferência de calor, desenvolvido por Morsch Filho (2021), é utilizado na obtenção do fluxo de irradiação $G_{w,s,t}$ (W/m²) em cada face w , de cada CubeSat s , para cada instante de tempo t . A ferramenta prevê a posição e inclinação de cada satélite com base em parâmetros orbitais definidos pelo usuário, nomeadamente: inclinação orbital; ângulo do nodo ascendente; excentricidade; argumento de perigeu; anomalia média; e movimentação média.

O modelo é válido para órbitas terrestres baixas (*low Earth orbit*/LEO) elípticas ou circulares, e para qualquer tamanho de CubeSat, desde que não possua partes desdobráveis (*deployable*). A energia solar fotovoltaica total disponível ($r_{s,t}$) é dada pela equação (9), na qual η é a eficiência (%) das células fotovoltaicas e A_w é a área total (m²) das células solares na face w do CubeSat.

$$r_{s,t} = \sum_{w=1}^6 \eta A_w G_{w,s,t} \quad (9)$$

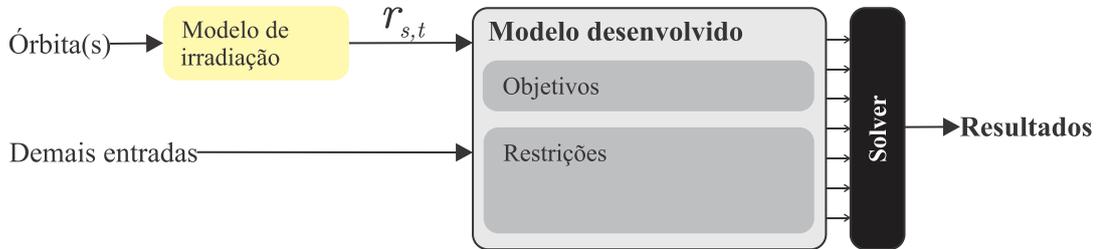
Caso deseje-se simular uma missão que não utilize o padrão CubeSat, faz-se necessário que estes dados sejam obtidos por meio de outro modelo de irradiação – específico para o formato dos satélites em questão.

4.2 MODELO DESENVOLVIDO

Uma visão geral do modelo desenvolvido, e de como ele se integra com o modelo auxiliar descrito na Seção anterior, é ilustrada na Figura 6. Os detalhes acerca da formulação

são apresentados nesta Seção, dividida em partes, a saber: Notação; Objetivos; Restrições; e Implementação da fronteira de Pareto.

Figura 6 – Diagrama de blocos simplificado do modelo desenvolvido e sua integração com os modelos auxiliares e o ambiente de resolução (solver)



Fonte: Autoria própria.

4.2.1 Notação

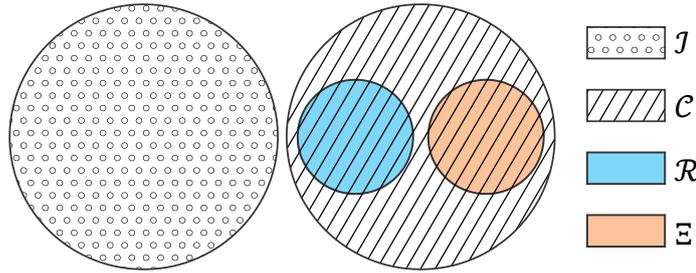
No contexto desta pesquisa, entende-se como **subsistema** um CubeSat que faça parte de uma constelação (contendo S satélites). É tratada como **tarefa** uma atividade a ser realizada por um satélite que possua alto impacto energético e demore uma ou mais unidades de tempo para ser completamente executada – ex.: ativação de uma *payload* (carga útil); rotina de processos computacionais; captura e/ou processamento de imagens. Uma **unidade de tempo** corresponde a uma fração da órbita – nos exemplos simulados, equivalente a um minuto.

Para melhor representar uma constelação, as tarefas foram divididas em subconjuntos:

- São **tarefas de constelação** aquelas que são atribuídas à constelação como um todo e podem ser realizadas por quaisquer subsistemas – ex.: transferência de dados compartilhados entre os satélites para a estação terrestre. As **tarefas de constelação** podem ser:
 - **Tarefas síncronas**, isto é, tarefas que precisam ser executadas, de forma sincronizada, por mais de um satélite – ex.: rotinas que requeiram, da constelação, um comportamento de rede.
 - As demais **tarefas de constelação**, que não sejam **síncronas**, podem, opcionalmente, ter **redundância encorajada**, ou seja, possuírem execuções estimuladas a ocorrerem em mais de um subsistema, de forma concomitante, atributo que pode ser relevante para sistemas críticos.
- São **tarefas individuais** as que são atribuídas a um subsistema específico – ex.: *house keeping*; transferência de dados de um satélite específico para a estação terrestre.

O Quadro 2 apresenta as notações adotadas para representar os conjuntos, os índices associados a estes, os subconjuntos e as variáveis do modelo. Adicionalmente, a Figura 7 representa graficamente os subconjuntos de tarefas (\mathcal{J}). No quadro, as variáveis do modelo correspondem às saídas – ou resultados (Figura 6) –, ou seja, são valores determinados com a obtenção da solução ótima.

Figura 7 – Representação gráfica dos subconjuntos de tarefas



Fonte: Autoria própria.

Quadro 2 – Conjuntos, subconjuntos e variáveis do modelo.

Notação	Descrição
Conjuntos	
\mathcal{S}	Conjunto de subsistemas (satélites). $\mathcal{S} = \{s \mid s \in \mathbb{N}, s \leq S\}$.
\mathcal{J}	Conjunto de tarefas (ou <i>jobs</i>). $\mathcal{J} = \{j \mid j \in \mathbb{N}, j \leq J\}$.
\mathcal{T}	Conjunto de unidades de tempo. $\mathcal{T} = \{t \mid t \in \mathbb{N}, t \leq T\}$.
Subconjuntos (Figura 7)	
\mathcal{C}	Conjunto de tarefas de constelação. $\mathcal{C} \subset \mathcal{J}$.
\mathcal{J}	Conjunto de tarefas individuais. $\mathcal{J} \subseteq (\mathcal{J} \setminus \mathcal{C})$
\mathcal{E}	Conjunto de tarefas síncronas. $\mathcal{E} \subset \mathcal{C}$
\mathcal{R}	Conjunto de tarefas com redundância encorajada. $\mathcal{R} \subset (\mathcal{C} \setminus \mathcal{E})$
Variáveis do modelo	
$x_{s,j,t}$	Variável de decisão. Possui valor igual a 1 quando, no subsistema s , a tarefa j está sendo executada no instante t ; caso contrário, possui valor igual a 0. $x_{s,j,t} \in \{0,1\}$.
$\phi_{s,j,t}$	Variável auxiliar. Possui valor igual a 1 quando, no subsistema s , a tarefa j está iniciando sua execução no instante t ; caso contrário, possui valor igual a 0. $\phi_{s,j,t} \in \{0,1\}$.
$\alpha_{s,j,t}$	Variável auxiliar. Possui valor igual a 1 quando, no subsistema s , a tarefa j está encerrando sua execução no instante t ; caso contrário, possui valor igual a 0. $\alpha_{s,j,t} \in \{0,1\}$.
$\beta_{s,s',j,t}$	Variável auxiliar. Possui valor igual a 1 quando a tarefa j está sendo inicializada nos subsistemas s e s' no instante t ; caso contrário, possui valor igual a 0. $\beta_{s,s',j,t} \in \{0,1\}$.
$b_{s,t}$	Variável auxiliar. Possui valor igual a 1 quando, no subsistema s , a bateria está sendo carregada no instante t ; caso contrário (bateria sendo descarregada), possui valor igual a 0. $b_{s,t} \in \{0,1\}$.
$SoC_{s,t}$	Estado de carga da bateria do subsistema s , no instante t . $SoC_{s,t} \in \mathbb{R}^+, \leq 1$.
$\lambda_{s,t}$	Utilização da capacidade de corrente (γ) da bateria do subsistema s , no instante t . $\lambda_{s,t} \in \mathbb{R}^+, \leq 1$.
$i_{s,t}$	Corrente da bateria, em Ampère, para o subsistema s no instante t . $i_{s,t} \in \mathbb{R}$.

Fonte: Autoria própria.

As **entradas do modelo** são pré-determinadas e as notações adotadas estão dispostas no Quadro 3. No contexto das implementações conduzidas para demonstração e avaliação da

formulação (tema do capítulo 5), o vetor de potência disponibilizada pelos painéis solares ($r_{s,t}$) é fornecido pelo modelo de irradiação (4.1), conforme ilustrado no diagrama da Figura 6.

Quadro 3 – Entradas do modelo

Notação	Descrição
M	Um número suficientemente grande. $M \in \mathbb{N}$.
V_b	Tensão nominal da bateria, em Volts. $V_b \in \mathbb{R}^+$.
γ	Máxima corrente de carga/descarga bateria, em Ampères. Com base na capacidade nominal. $\gamma \in \mathbb{R}^+$.
$SoC_{s,0}$	Estado de carga inicial da bateria do subsistema s . $SoC_{s,0} \in \mathbb{R}^+, \leq 1$.
e_c	Eficiência de carregamento da bateria. $e_c \in \mathbb{R}^+, \leq 1$.
e_d	Eficiência de descarregamento da bateria. $e_d \in \mathbb{R}^+, \leq 1$.
Q	Capacidade nominal da bateria, em Ampère-hora (Ah). $Q \in \mathbb{R}^+$.
ρ	Estado de carga mínimo admitido. $\rho \in \mathbb{R}^+, < 1$.
$r_{s,t}$	Potência disponibilizada pelos painéis solares no subsistema s e instante t . $r_{s,t} \in \mathbb{R}^+$.
$q_{s,j}$	Potência necessária para executar a tarefa j no subsistema s . $q_{s,t} \in \mathbb{R}^+$.
$u_{s,j,t}$	Prioridade dinâmica da tarefa j , no instante t , no subsistema s . $u_{s,j,t} \in \mathbb{W}$.
$t_{s,j}^{min/max}$	Tempo mínimo/máximo necessário para executar a tarefa j no subsistema s . $t_{s,j}^{min/max} \in \mathbb{N}$.
$y_{s,j}^{min/max}$	Número mínimo/máximo de execuções (inicializações) desejadas para a tarefa j no subsistema s . $y_{s,j}^{min/max} \in \mathbb{W}$.
$g_j^{min/max}$	Número mínimo/máximo de execuções (inicializações) desejadas para a tarefa j na constelação. $g_j^{min/max} \in \mathbb{W}$.
$p_{s,j}^{min/max}$	Período mínimo/máximo entre execuções da tarefa j no subsistema s . $p_{s,j}^{min/max} \in \mathbb{N}$.
$w_{s,j}^{min/max}$	Início(min)/final(max) da janela de execução da tarefa j no subsistema s . $w_{s,j}^{min/max} \in \mathbb{W}$.
$\psi_j^{min/max}$	Número mínimo/máximo de subsistemas com permissão para executar a tarefa j em um mesmo instante (simultaneamente). $\psi_j^{min/max} \in \mathbb{W}$.

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Objetivos

A função F (10) representa os objetivos do problema e divide-se em três partes: **A**, que contabiliza a parcela da QoS da missão referente às tarefas de constelação ($j \in \mathcal{C}$); **B**, que contabiliza a parcela da QoS referente às tarefas individuais ($j \in \mathcal{J}$); e **C**, cuja maximização encoraja tarefas de constelação não síncronas ($j \in \mathcal{R}$) a serem executadas com redundância. A consideração (opcional) do termo **C** deve ser acompanhada da inclusão do peso ω_C e da restrição (23), que introduz a variável binária $\beta_{s,s',j,t}$ ao problema, possibilitando a identificação correta de redundâncias. Esta divisão dos objetivos flexibiliza as possibilidades de abordagem pelo tomador de decisões: os objetivos podem ser simplificados como uma soma, combinados de maneiras distintas, ou tratados individualmente. Neste último caso, a resolução do problema ocorre por meio do método ϵ -constraint modificado (MAVROTAS, 2009), não considera o

termo C, e viabiliza a análise da *trade-off* entre A e B, que fazem uso de recurso limitado (energia) de forma concorrente.

$$\begin{aligned}
 F : \max_{x_{s,j,t}} & \underbrace{\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{C}} \sum_{t \in \mathcal{T}} u_{s,j,t} x_{s,j,t}}_A + \underbrace{\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} u_{s,j,t} x_{s,j,t}}_B \\
 & + \omega_C \underbrace{\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{s' \in \mathcal{S} \setminus \{s\}} \sum_{j \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \beta_{s,s',j,t}}_C
 \end{aligned} \tag{10}$$

É relevante ressaltar que, no escopo desta formulação, a qualidade de serviço (QoS) consiste na maximização do tempo no qual as tarefas ficam ativas em relação às prioridades destas.

4.2.3 Restrições

Para fins de clareza, as restrições do modelo, apresentadas nesta Seção, estão divididas nas categorias: variáveis auxiliares; contagem de inicializações, tempo e janela de execução; potência disponível; e constelação.

4.2.3.1 Restrições: variáveis auxiliares

Duas variáveis binárias auxiliam na identificação do momento no qual uma tarefa inicia – “borda de subida” – e o momento no qual ela termina – “borda de descida”. A primeira, denotada por ϕ , é definida de acordo com o estado atual da tarefa j no subsistema s ($x_{s,j,t}$) e o estado anterior ($x_{s,j,(t-1)}$), conforme as restrições descritas pelo conjunto de expressões (11).

$$\phi_{s,j,1} \geq x_{s,j,1}, \quad \forall j, \forall s \tag{11.a}$$

$$\phi_{s,j,t} \geq x_{s,j,t} - x_{s,j,(t-1)}, \quad \forall j, \forall t > 1, \forall s \tag{11.b}$$

$$\phi_{s,j,t} \leq x_{s,j,t}, \quad \forall j, \forall t, \forall s \tag{11.c}$$

$$\phi_{s,j,t} \leq 2 - x_{s,j,t} - x_{s,j,(t-1)}, \quad \forall j, \forall t > 1, \forall s \tag{11.d}$$

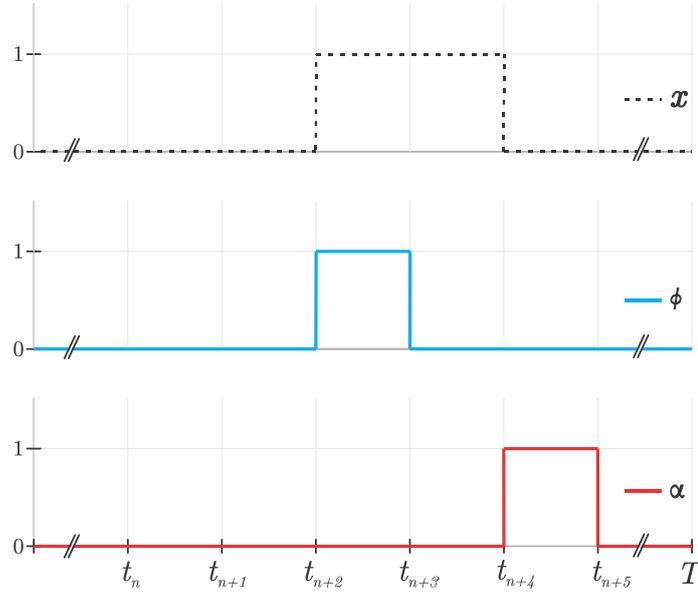
A segunda variável binária auxiliar é denotada por α e possui valor 1 no instante no qual uma tarefa j , em um subsistema s , se encerra. O valor de α é determinado com base em: $\phi_{s,j,t}$, $x_{s,j,t}$ e $x_{s,j,(t-1)}$. As restrições que resultam no comportamento desejado desta variável são expressas por (12).

$$\alpha_{s,j,t} \geq x_{s,j,(t-1)} - x_{s,j,t}, \quad \forall j, \forall t > 1, \forall s \tag{12.a}$$

$$\alpha_{s,j,t} \leq x_{s,j,(t-1)}, \quad \forall j, \forall t > 1, \forall s \tag{12.b}$$

$$\alpha_{s,j,t} \leq x_{s,j,(t-1)} - x_{s,j,t} + \phi_{s,j,t}, \quad \forall j, \forall t > 1, \forall s \tag{12.c}$$

É relevante ressaltar que $\alpha_{s,j,1} = 0, \forall j, \forall s$, pois a execução de uma tarefa não pode encerrar no primeiro instante de tempo da órbita. Um exemplo ilustrativo do comportamento de ϕ , α , e da forma como se relacionam com x , é exibido na Figura 8.

Figura 8 – Variáveis auxiliares ϕ e α


Fonte: Autoria própria.

4.2.3.2 Restrições: contagem de inicializações, tempo e janela de execução

O conjunto de equações (13) garante que uma tarefa não possa ser executada fora da janela de execução estabelecida, forçando que o valor de $x_{s,j,t}$ seja zero. A janela de execução de uma tarefa j , em um subsistema s é definida por $[w_{s,j}^{min}, w_{s,j}^{max}]$.

$$\sum_{t=1}^{w_{s,j}^{min}} x_{s,j,t} = 0, \forall j, \forall s \quad (13.a)$$

$$\sum_{t=w_{s,j}^{max}+1}^T x_{s,j,t} = 0, \forall j, \forall s \quad (13.b)$$

Intervalos mínimos ($p_{s,j,t}^{min}$) e máximos ($p_{s,j,t}^{max}$) entre as inicializações das tarefas, dadas pela variável auxiliar $\phi_{s,j,l}$, são definidos pelas restrições (14.a) e (14.b), que garantem, respectivamente, que haja pelo menos uma inicialização da tarefa dentro de um intervalo $p_{s,j,t}^{max}$ e no máximo uma dentro de um intervalo $p_{s,j,t}^{min}$.

$$\sum_{l=t}^{t+p_{s,j,t}^{min}-1} \phi_{s,j,l} \leq 1, \forall t \in \{1, \dots, T - p_{s,j,t}^{min} + 1\}, \forall j, \forall s \quad (14.a)$$

$$\sum_{l=t}^{t+p_{s,j,t}^{max}-1} \phi_{s,j,l} \geq 1, \forall t \in \{1, \dots, T - p_{s,j,t}^{max} + 1\}, \forall j, \forall s \quad (14.b)$$

O conjunto de restrições (15) garante que, uma vez iniciada a execução de uma tarefa, esta seja concluída, com sucesso, antes que a órbita termine, respeitando limites de tempo

mínimo $t_{s,j,t}^{min}$ (15.a e 15.c) e máximo $t_{s,j,t}^{max}$ (15.b) necessário para a efetivação. O limite inferior de tempo ($t_{s,j,t}^{min}$) tem referência na inicialização da tarefa ($\phi_{s,j,t}$). A restrição (15.c) é específica para os últimos instantes da órbita, e garante que a tarefa fique ativa até a órbita se encerre, caso seu início ocorra dentro dos últimos $t_{s,j,t}^{min}$ minutos.

$$\sum_{l=t}^{t+t_{s,j,t}^{min}-1} x_{s,j,l} \geq t_{s,j,t}^{min} \phi_{s,j,t}, \forall t \in \{1, \dots, T - t_{s,j,t}^{min} + 1\}, \forall j, \forall s \quad (15.a)$$

$$\sum_{l=t}^{t+t_{s,j,t}^{max}} x_{s,j,l} \leq t_{s,j,t}^{max}, \forall t \in \{1, \dots, T - t_{s,j,t}^{max}\}, \forall j, \forall s \quad (15.b)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{T}} x_{s,j,l} \geq (T - l + 1) \phi_{s,j,t}, \forall t \in \{T - t_{s,j,t}^{min} + 2, \dots, T\}, \forall j, \forall s \quad (15.c)$$

Quantidades mínima ($y_{s,j}^{min}$) e máxima ($y_{s,j}^{max}$) de inicializações de uma tarefa j em um subsistema s são estabelecidas através das restrições (16.a) e (16.b), respectivamente.

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \phi_{s,j,t} \geq y_{s,j}^{min}, \forall j, \forall s \quad (16.a)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \phi_{s,j,t} \leq y_{s,j}^{max}, \forall j, \forall s \quad (16.b)$$

4.2.3.3 Restrições: potência disponível

Um modelo de bateria é utilizado no cálculo do estado de carga (SoC) com base em uma representação *Generalized Disjunctive Program* (GDP) (GROSSMANN e LEE, 2003) da equação de cálculo do SoC em termos da capacidade nominal da bateria (Q) e da corrente em função do tempo: $\text{SoC}(t) = \frac{1}{Q} \int i(t) dt$. A representação foi desenvolvida por Rigo *et al.* (2021) e embasa as restrições (17.a)-(17.f), que determinam a corrente ($i_{s,t}$) e o estado de carga ($\text{SoC}_{s,t}$) da bateria recarregável do subsistema s , para cada instante de tempo t . Nas restrições, a variável binária $b_{s,t}$ identifica se a bateria está sendo carregada ou descarregada e, utilizando-se do método *big-M*, determina a eficiência a ser aplicada (se e_c ou e_d).

$$\text{SoC}_{s,t+1} \geq \text{SoC}_{s,t} + \frac{i_{s,t} \cdot e_c}{60 Q} - M \cdot (1 - b_{s,t}), \forall t, \forall s \quad (17.a)$$

$$\text{SoC}_{s,t+1} \leq \text{SoC}_{s,t} + \frac{i_{s,t} \cdot e_c}{60 Q} + M \cdot (1 - b_{s,t}), \forall t, \forall s \quad (17.b)$$

$$\text{SoC}_{s,t+1} \geq \text{SoC}_{s,t} + \frac{i_{s,t} \cdot e_d}{60 Q} - M \cdot b_{s,t}, \forall t, \forall s \quad (17.c)$$

$$\text{SoC}_{s,t+1} \leq \text{SoC}_{s,t} + \frac{i_{s,t} \cdot e_d}{60 Q} + M \cdot b_{s,t}, \forall t, \forall s \quad (17.d)$$

$$i_{s,t} \leq M \cdot b_{s,t}, \forall t, \forall s \quad (17.e)$$

$$i_{s,t} \geq -M \cdot (1 - b_{s,t}), \forall t, \forall s \quad (17.f)$$

O estado de carga da bateria deve oscilar entre totalmente carregada (18.a) e parcialmente descarregada, visto que descargas completas impactariam negativamente na vida útil da bateria. Por este motivo, um limite mínimo (ρ) é imposto ao $\text{SoC}_{s,t}$ (18.b).

$$\text{SoC}_{s,t} \leq 1, \forall s, \forall t \quad (18.a)$$

$$\text{SoC}_{s,t} \geq \rho, \forall s, \forall t \quad (18.b)$$

A restrição (19) limita o consumo de energia no subsistema s , em um instante t , à soma da potência disponibilizada pelos painéis solares ($r_{s,t}$) com uma parcela da energia disponível na bateria (γV_b). O consumo, para cada instante de tempo t , equivale à soma das potências necessárias ($q_{s,j}$) para executar cada tarefa ativa ($x_{s,j,t}$) neste mesmo instante. Esta restrição fundamenta-se na formulação apresentada por Rigo *et al.* (2021), na qual os autores definem esta limitação, controlada pelo termo $\lambda_{s,t}$, com base em restrições Fuzzy. Assume-se que todos os satélites da constelação possuem as mesmas propriedades construtivas; conseqüentemente, as informações nominais de bateria são consideradas idênticas para todos os subsistemas.

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} q_{s,j} x_{s,j,t} \leq r_{s,t} + \gamma V_b (1 - \lambda_{s,t}), \forall s, \forall t \quad (19)$$

4.2.3.4 Restrições: constelação

Além das quantidades mínima ($y_{s,j}^{\min}$) e máxima ($y_{s,j}^{\max}$) de inicializações de uma tarefa j em um subsistema s , estabelecidas pelo conjunto de restrições (16), uma mínima (g_j^{\min}) e uma máxima (g_j^{\max}) gerais são definidas, pelo conjunto de restrições (20), para as inicializações de uma tarefa j na constelação como um todo, ou seja, considerando todos os subsistemas.

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \phi_{s,j,t} \geq g_j^{\min}, \forall j \in \mathcal{C} \quad (20.a)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \phi_{s,j,t} \leq g_j^{\max}, \forall j \in \mathcal{C} \quad (20.b)$$

As expressões (21.a) e (21.b), respectivamente, estabelecem uma quantidade mínima (ψ_j^{\min}) e uma máxima (ψ_j^{\max}) de subsistemas a estarem executando uma mesma tarefa j , em um mesmo instante t , de forma simultânea. Esta condição aplica-se a tarefas de constelação – com exceção das síncronas (\mathcal{E}) – e deve ser útil em casos nos quais é necessário que uma tarefa esteja sempre sendo executada por um ou mais satélites para ($\psi_j^{\min} \geq 1$) ou quando deseja-se limitar a execução por mais de um satélite de forma simultânea ($\psi_j^{\max} < S$). Como valores padrão, para casos nos quais essas condições não são necessárias, sugere-se adotar $\psi_j^{\min} = 0$ e $\psi_j^{\max} = S$.

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} x_{s,j,t} \geq \psi_j^{\min}, \forall t, \forall j \in \mathcal{C} \setminus \Xi \quad (21.a)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} x_{s,j,t} \leq \psi_j^{\max}, \forall t, \forall j \in \mathcal{C} \setminus \Xi \quad (21.b)$$

Tarefas síncronas ($j \in \Xi$) precisam ser realizadas simultaneamente por todos os satélites da constelação, com início e fim sincronizados entre todos. Este comportamento de rede pode ser alcançado por meio do conjunto de restrições (22).

$$\sum_{s' \in \mathcal{S}} \phi_{s',j,t} \geq |\mathcal{S}| \phi_{s,j,t}, \forall t, \forall j \in \Xi, \forall s \quad (22.a)$$

$$\sum_{s' \in \mathcal{S}} \alpha_{s',j,t} \geq |\mathcal{S}| \alpha_{s,j,t}, \forall t, \forall j \in \Xi, \forall s \quad (22.b)$$

A restrição (23) relaciona-se com o termo C da função objetivo (10) e provém ao modelo uma tolerância a faltas ao estimular que algumas tarefas de constelação ($j \in \mathcal{R}$) sejam executadas de forma redundante. A expressão (23) torna a variável binária $\beta_{s,s',j,t} = 1$ quando a inicialização de uma tarefa j ocorre concomitantemente (no mesmo instante t), nos satélites s e s' , ou seja, quando $\phi_{s,j,t} = \phi_{s',j,t} = 1$.

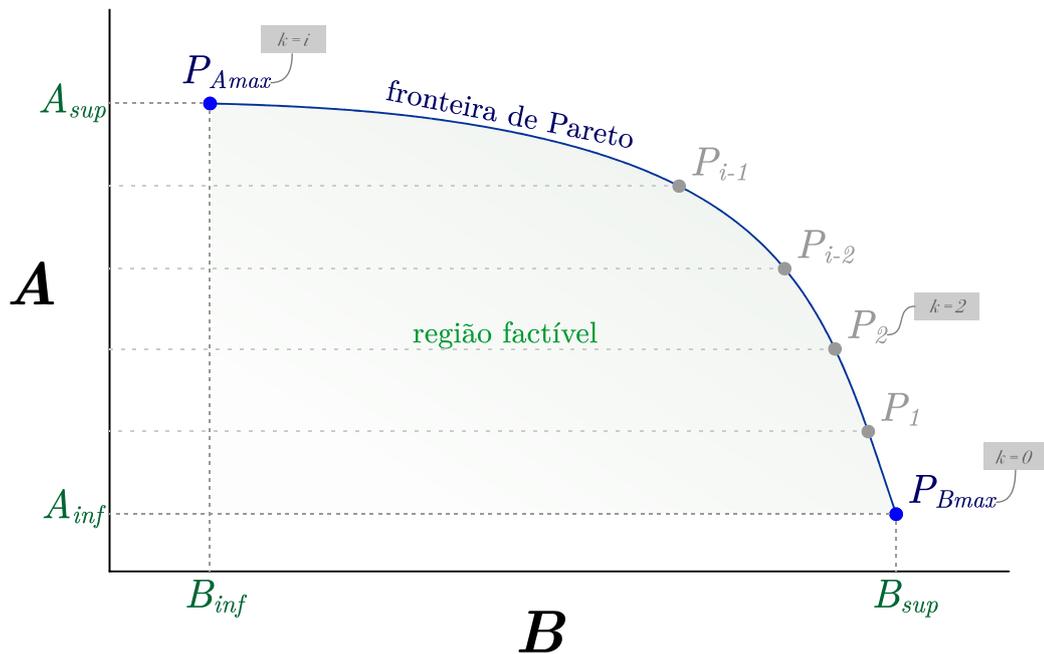
$$\phi_{s,j,t} + \phi_{s',j,t} \geq 2 - M(1 - \beta_{s,s',j,t}), \forall t, \forall j, \forall s \in \mathcal{R}, \forall (s' \neq s) \in \mathcal{R} \quad (23)$$

4.2.4 Implementação da fronteira de Pareto

A abordagem do problema como sendo multiobjetivo é dada através da implementação do método ϵ -constraint modificado (MAVROTAS, 2009), apresentado na Seção 3.1.3. Nesta pesquisa, o método é aplicado ao modelo desenvolvido considerando os termos A e B da função (10) como objetivos distintos, resultando na fronteira de Pareto que representa o *trade-off* entre a QoS coletiva e a QoS de tarefas individuais – o termo C não é considerado por representar redundância, não QoS. É intuito desta Seção detalhar como é feita esta aplicação.

A implementação inicia com a maximização das tarefas de constelação (objetivo A), o que resulta no limite superior deste objetivo (A_{sup}). Em seguida, o problema é resolvido com a maximização de B e com a restrição de que A seja igual à soma do seu valor máximo definido no passo anterior (A_{sup}), com uma variável de folga ϵ ; esta etapa resulta no primeiro ponto extremo da fronteira de Pareto (P_{Amax}), no qual o valor de A é o máximo possível e o de B é seu limite inferior B_{inf} . Para a obtenção do outro ponto extremo da fronteira, o processo é repetido com os objetivos A e B em posições trocadas, o que resulta no ponto P_{Bmax} (A_{inf}, B_{sup}). A Figura 9 ilustra, em azul, os valores e pontos obtidos nestas etapas iniciais.

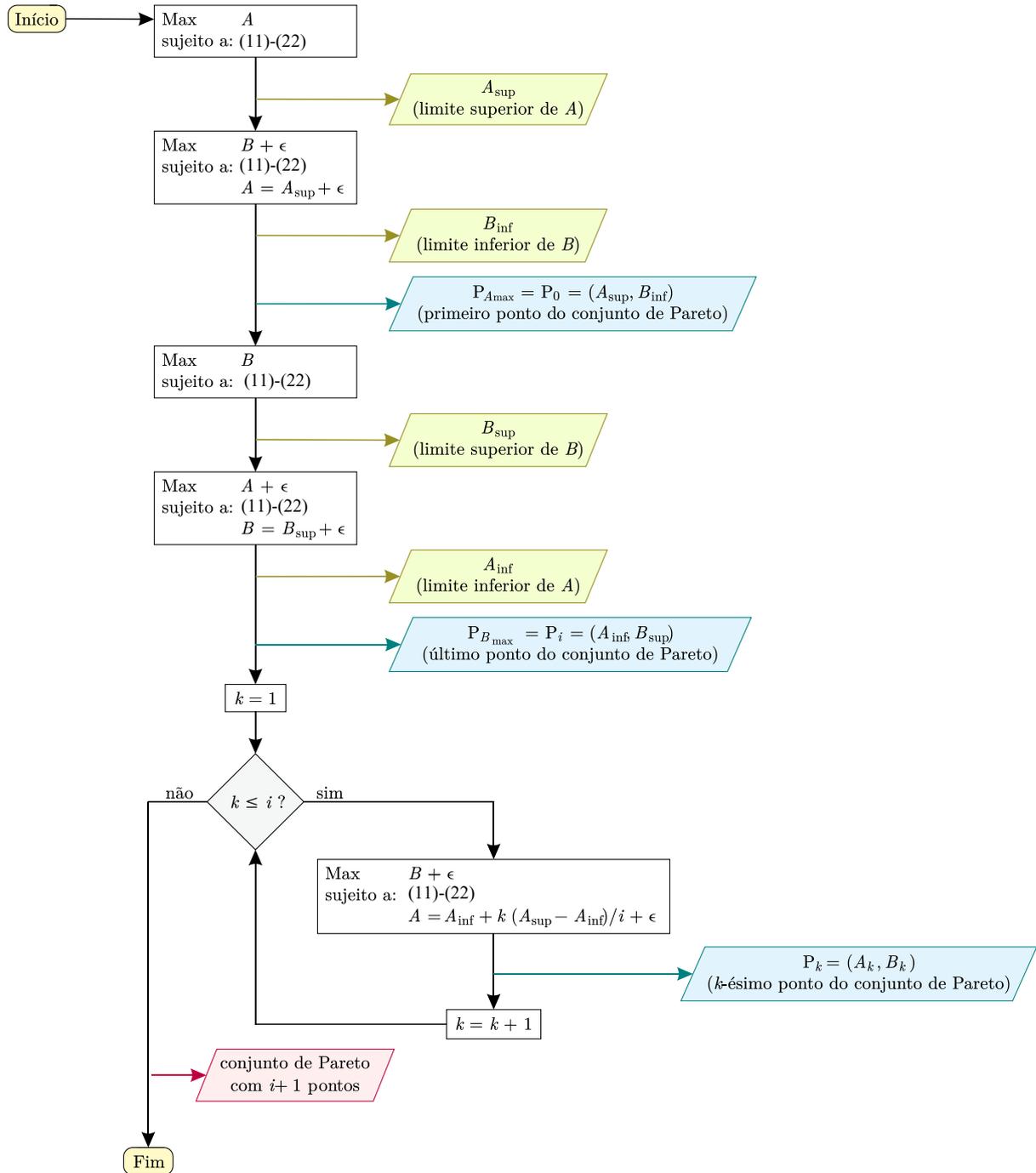
Figura 9 – Representação da fronteira de Pareto para um problema com dois objetivos (A e B)



Fonte: Autoria própria.

Após a definição dos pontos extremos, é necessário determinar qual a resolução desejada para a fronteira de Pareto, ou seja, quantos pontos se deseja obter. Os pontos, ilustrados em cinza na Figura 9, são obtidos com a maximização de B restrita a fixação de A em valores equidistantes dentro dos limites $[A_{inf}, A_{sup}]$. Os cálculos são parte de um processo iterativo, guiado por um índice k . Um fluxograma representativo de todas as etapas da obtenção da fronteira de Pareto com $i + 1$ pontos é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma representativo da aplicação do método ϵ -constraint modificado para a obtenção de um conjunto de pontos Pareto-ótimos



Fonte: Autoria própria.

Conforme elucidado em 3.1.3, a soma da variável de folga ϵ na função objetivo e nas restrições que fixam valores de A ou B garante que todos os pontos encontrados sejam ótimos de Pareto.

4.2.5 Síntese

Esta Seção apresenta uma síntese do modelo desenvolvido, destinado ao planejamento de missões de constelações de *SmallSats*. A formulação tem como objetivo melhorar a

qualidade de serviço da missão, definida como a maximização do tempo no qual as tarefas ficam ativas em relação às prioridades destas, levando em conta as restrições e requisitos de cada uma. Tal maximização pode ser abordada de diferentes formas:

- *QoS geral, sem estímulo de redundância:* Maximiza a soma da QoS coletiva – A, na função objetivo (10) – com a QoS individual – B, na função objetivo (10). Nesta abordagem, o problema é descrito como:

$$F: \quad \max_{x_{s,j,t}} A + B \quad (24.a)$$

$$\text{sujeito a: } (11)-(22) \quad (24.b)$$

- *QoS coletiva e QoS individual, com obtenção da fronteira de Pareto:* Esta abordagem emprega o método ϵ -constraint modificado (MAVROTAS, 2009) na obtenção da fronteira de Pareto do problema, considerando os objetivos A e B – exibidos na função objetivo (10). O problema é descrito por (25) e resolvido por meio do método apresentado na Seção 4.2.4 e ilustrado na Figura 10.

$$F: \quad \max_{x_{s,j,t}} [A, B] \quad (25.a)$$

$$\text{sujeito a: } (11)-(22) \quad (25.b)$$

- *QoS geral, com estímulo de redundância:* Maximiza a soma da QoS coletiva, QoS individual e termo de redundância estimulada – C, na função objetivo (10). O problema, nesta abordagem, é descrito conforme (26).

$$F: \quad \max_{x_{s,j,t}} A + B + \omega_c C \quad (26.a)$$

$$\text{sujeito a: } (11)-(23) \quad (26.b)$$

A formulação apresentada resulta em um problema de otimização inteiro-misto (MIP), que pode ser resolvido de forma a alcançar a otimalidade ou próximo da otimalidade (dentro de um *gap* de tolerância) por algoritmos exatos, tal qual o *branch and bound*, encontrados em *solvers* de prateleira – gratuitos ou comerciais.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta simulações de diferentes cenários e os resultados correspondentes a estas. Todas as implementações⁶ foram feitas na linguagem de programação Julia⁷ (BEZANSON, EDELMAN, *et al.*, 2017), juntamente com o pacote JuMP⁸, responsável pela interface entre a linguagem Julia e o *solver* Gurobi⁹, que recebe, como entrada, o modelo – função objetivo e restrições –, executa o algoritmo de otimização, e retorna a solução ótima para o problema apresentado. Mais detalhes acerca do aparato utilizado na condução das simulações são exibidos no Quadro 4.

Quadro 4 – Aparato utilizado na implementação

<i>Solver</i>	Gurobi 9.5.0
GAP	$\leq 1\%$
Limite de tempo (por problema)	Sem limite definido
Linguagem de modelagem	Julia 1.6.2
Pacotes	JuMP
Processador	Intel® Xeon® CPU E5-2630 v4 @ 2.20GHz
Cores Threads	20 40
RAM	64 GB
Sistema operacional	Ubuntu 20.04.2 LTS 64 bits

Fonte: Autoria própria.

Todos os cenários simulados consideraram constelações de **CubeSats 3U** e órbitas com as mesmas características (descritas no Quadro 5), baseadas nos parâmetros orbitais da missão FloripaSat-I (MARCELINO, MORSCH FILHO, *et al.*, 2021). Tais parâmetros serviram de entrada para o modelo de irradiação (MORSCH FILHO, 2021) – referido, previamente, no tópico “Modelo auxiliar: Irradiação (CubeSats)” (4.1) –, o qual retornou dados de captação de energia prevista para cada instante de tempo.

⁶ Repositório da implementação: <https://github.com/b-rib/ETaSCoN>

⁷ Mais informações disponíveis em: <https://julialang.org>

⁸ Disponível em: <https://jump.dev>

⁹ Disponível em: <https://www.gurobi.com>

Quadro 5 – Parâmetros da órbita

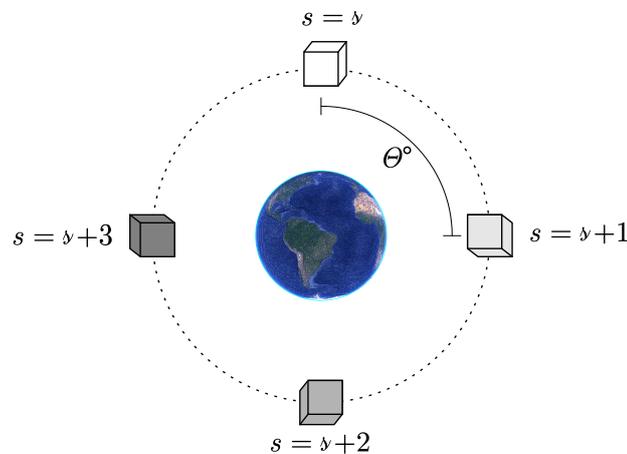
Tipo da órbita	NADIR* Semicircular com eclipse
Período (minutos)	96
Altitude (km)	623
Inclinação da órbita (°)	97,9500
Ângulo do nodo ascendente (°)	225,7800
Excentricidade (-)	0,0016
Argumento de perigeu (°)	111,3800
Anomalia média (°)	248,9100
Movimentação média (rev/dia)	14,8200

* Órbita na qual uma face específica do satélite está sempre voltada para a Terra

Fonte: Autoria própria.

Adotou-se uma defasagem entre as órbitas de cada satélite da constelação (s) determinada em função da quantidade de satélites (S) e da duração da órbita (T). A Figura 11 ilustra como esta consideração se aplicaria a uma constelação de quatro satélites; as equações (27.a) e (27.b) revelam, respectivamente, o cálculo da defasagem angular (θ) entre os satélites e atribuição, dentre todos os S satélites, dos valores de irradiação ($r_{s,t}$).

Figura 11 – Ilustração da defasagem orbital adotada (no exemplo, $S = 4$)



Fonte: Autoria própria.

$$\theta = 360^\circ/S \quad (27.a)$$

$$r_{(s+1),t} = r_{s,(t-T \cdot [(s+1)-1]/S)} \quad (27.b)$$

Consideraram-se todos os satélites da constelação como sendo estruturalmente idênticos. Portanto, nas simulações, os parâmetros de bateria adotados (Quadro 6) são válidos para quaisquer satélites.

Quadro 6 – Parâmetros de bateria

γ	ρ	Q	V_b	$e_{c/d}$	$SoC_{s,0}$
5 A	0,6	5 Ah	3,6 V	0,9	0,75

Fonte: Autoria própria.

Em todos os cenários, foram consideradas: **cinco tarefas de constelação** ($\mathcal{C} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$) e **cinco tarefas individuais** ($\mathcal{J} = \{6, 7, 8, 9, 10\}$) para cada satélite integrante da constelação. Dentre as tarefas de constelação, **uma tarefa** foi estabelecida como **síncrona** ($\Xi = \{2\}$). Os parâmetros das tarefas foram gerados aleatoriamente, considerando os limites descritos no Quadro 7.

Quadro 7 – Limites utilizados na definição aleatória das propriedades das tarefas

Parâmetro	Intervalo	Unidade	Arredondamento*
$q_{j,t}$	[0,50 ; 3,00]	W	0,00
$u_{s,j,t}$	[1 ; J]	–	0
$t_{s,j}^{min}$	[1 ; T/10]	minutos	0
$t_{s,j}^{max}$	$[t_{s,j}^{min} ; T/4]$	minutos	0
$\gamma_{s,j}^{min}$	[1 ; T/45]	–	0
$\gamma_{s,j}^{max}$	$[\gamma_{s,j}^{min} ; T/15]$	–	0
g_j^{min}	[1 ; T/45]	–	0
g_j^{max}	$[g_j^{min} ; T/15]$	–	0
$p_{s,j}^{min}$	$[t_{s,j}^{max} + 1 ; T/4]$	–	0
$p_{s,j}^{max}$	$[p_{s,j}^{min} ; T]$	–	0
$w_{s,j}^{min}$	[1]	–	0
$w_{s,j}^{max}$	[T]	–	0
ψ_j^{min}	[0]	–	0
ψ_j^{max}	[S]	–	0

*Precisão de arredondamento para valor superior mais próximo

Fonte: Autoria própria.

5.1 SOMENTE A E B, SEM ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO (Cnr1)

Para o primeiro cenário (Cnr1), objetivou-se unicamente a maximização da soma entre A e B, não tendo havido, portanto, análise de *trade-off* entre os objetivos (fronteira de Pareto).

5.1.1 Exemplo inicial ilustrativo (Cnr1.1)

Na primeira parte do cenário Cnr1, a otimização foi executada para uma constelação com dois CubeSats 3U. O Quadro 8 resume as principais características e especifica as saídas da simulação Cnr1.1.

Quadro 8 – Síntese da implementação Cnr1.1

Tamanho da constelação (S)	2
Tarefas	5 Coletivas (1 síncrona) 10 Individuais (2x5)
Objetivo(s)	max A + B (eq. 10)
Saída(s) da implementação	2 Escalonamentos ótimos (1 por satélite); 2 Balanços energéticos (1 por satélite)

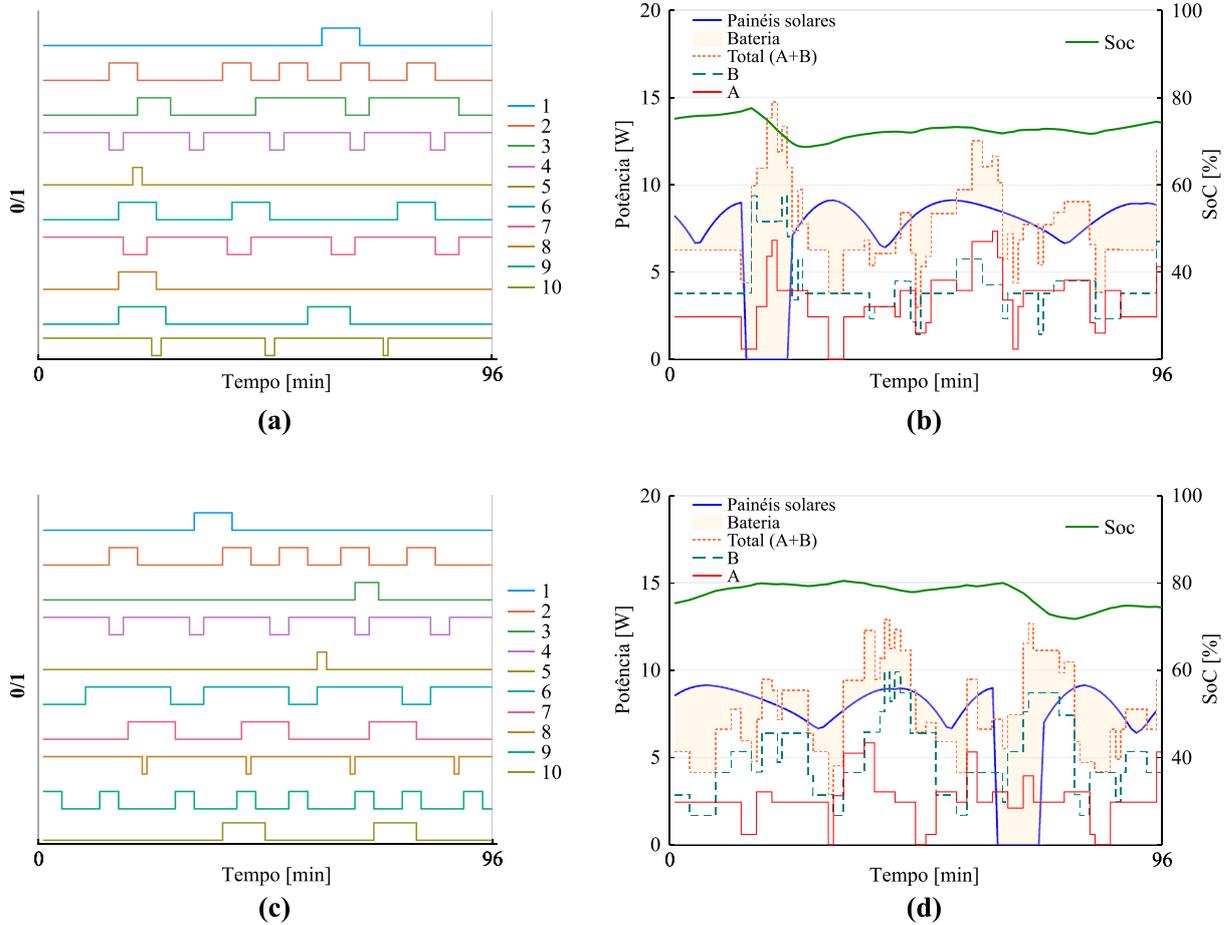
Fonte: Autoria própria.

5.1.1.1 Resultados

Os resultados do cenário Cnr1.1 (Figura 12) foram avaliados de forma conjunta com os parâmetros das tarefas a fim de atestar o cumprimento de todas as restrições estabelecidas. Foram observadas algumas correlações que ilustram a consistência dos resultados, a saber:

- Tarefas com alto consumo de energia e baixa prioridade são executadas de modo a atender somente aos requisitos mínimos. A tarefa 1, por exemplo, possui $q_{s,1} = 2,81 \text{ W } \forall s$, $u_{s,1,t} = 1 \forall t \forall s$, e precisa ser executada no mínimo 2 vezes pela constelação ($g_1^{min} = 2$); no resultado, ela é executada uma vez por cada satélite. Similarmente, a tarefa 5, que possui $q_{s,5} = 2,88 \text{ W } \forall s$, $u_{s,5,t} = 2 \forall t \forall s$, e $g_5^{min} = 2$, também é executada somente o mínimo de vezes. Em contrapartida, a tarefa 2, com $q_{s,2} = 0,59 \text{ W } \forall s$, $u_{s,2,t} = 10 \forall t \forall s$, e $y_{s,2}^{max} = 5 \forall s$ ocorre cinco vezes em cada CubeSat, o que corresponde ao seu limite superior de execuções. O mesmo ocorre com a tarefa 9 do satélite 2, cujos parâmetros são com $q_{2,9} = 1,18 \text{ W}$, $u_{2,9,t} = 9 \forall t$, e $y_{2,9}^{max} = 8$.
- A tarefa 2, definida como síncrona, tem início e fim idênticos entre os satélites.
- O estado de carga da bateria não atinge valores inferiores a 60% (ρ).
- O uso da bateria, em ambos os CubeSats, é mais intenso durante os períodos de eclipse, durante os quais são observadas as maiores quedas no estado de carga das baterias.

Figura 12 – Resultados do cenário Cnr1.1. (a, c) Escalonamentos ótimos e (b, d) balanços de energia dos satélites 1, 2



Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Variação do tamanho da constelação (Cnr1.2)

Ainda considerando somente os termos A e B como um único objetivo, foi executada segunda parte do cenário Cnr1, que leva em consideração diferentes tamanhos de constelações, com o objetivo de avaliar o impacto da variação de S nos termos A, B e no tempo de resolução da otimização pelo *solver* – conforme sintetiza o Quadro 9.

Quadro 9 – Síntese da implementação Cnr1.2

Tamanho da constelação (S)	2, 3, 4, 5 (variável)
Tarefas	5 Coletivas (1 síncrona) 10, 15, 20, 25 Individuais ($S \times 5$)
Objetivo(s)	max A + B (eq. 10)
Saída(s) da implementação	A e B em função de S ; Tempo de resolução em função de S

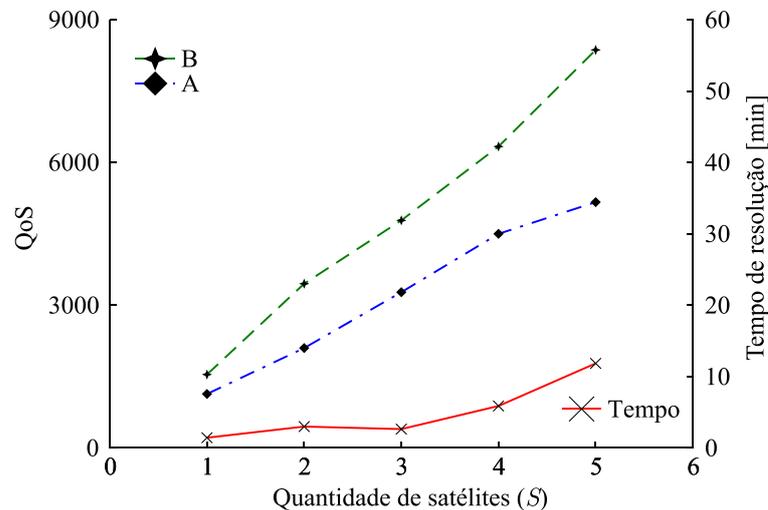
Fonte: Autoria própria.

5.1.2.1 Resultados

O aumento da quantidade de satélites na constelação reflete no aumento dos valores de A e B, ou seja, é diretamente proporcional à QoS da missão (Figura 13). A falta de linearidade nesta correlação deve-se às diferentes relações entre prioridade e consumo de energia nas tarefas dos CubeSats inseridos na simulação com parâmetros aleatórios. Além disso, os limites máximos gerais de execução das tarefas de constelação levam o valor de A a um platô à medida que mais satélites são adicionados.

Na Figura 13, também é possível observar a tendência de crescimento exponencial do tempo de resolução à medida em que a quantidade de satélites da constelação é incrementada. O tamanho da árvore de resolução do B&B cresce rapidamente com o aumento de um dos índices (s) das variáveis de decisão do problema.

Figura 13 – Resultados do cenário Cnr1.2. QoS (individual e coletiva) e tempo de resolução em função da quantidade de satélites na constelação



Fonte: Autoria própria.

5.2 SOMENTE A E B, COM ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO (CNR2)

Em um segundo cenário, A e B foram considerados objetivos concorrentes. Portanto, nestas simulações multiobjetivo, além dos escalonamentos ótimos e balanços energéticos dos satélites da constelação, foram obtidas e analisadas as fronteiras de Pareto referentes às otimizações de constelações com dois (Cnr2.1) e três (Cnr2.2) CubeSats 3U.

5.2.1 Constelação de dois satélites (Cnr2.1)

Nesta primeira parte do cenário Cnr2, o problema foi resolvido através do método ϵ -constraint modificado, cuja implementação foi tema da Seção 4.2.4. Além da fronteira de Pareto com resolução de seis pontos, os escalonamentos ótimos de ambos os satélites foram gerados para os dois pontos extremos de cada eixo da fronteira (Quadro 10).

Quadro 10 – Síntese da implementação Cnr2.1

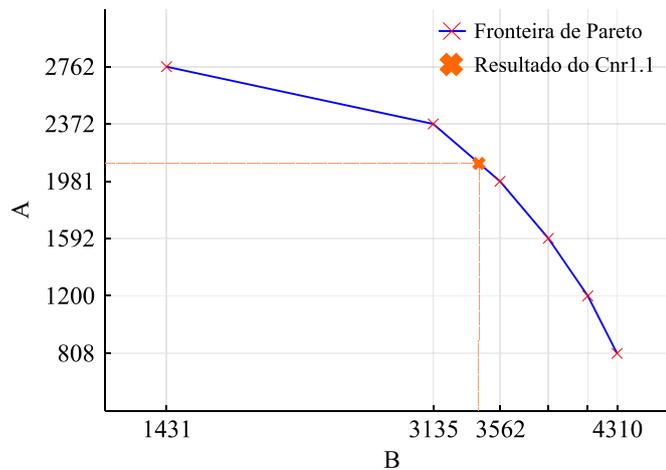
Tamanho da constelação (S)	2
Tarefas	5 Coletivas (1 síncrona) 10 Individuais (2x5)
Objetivo(s)	Ótimo de Pareto: max A, max B (eq. 10)
Saída(s) da implementação	Fronteira de Pareto (A e B; 6 pontos); 2 Escalonamentos ótimos do ponto no qual A é máximo (1 por satélite); 2 Escalonamentos ótimos do ponto no qual B é máximo (1 por satélite);

Fonte: Autoria própria.

5.2.1.1 Resultados

A Figura 14 exibe a fronteira de Pareto obtida na simulação do cenário Cnr2.1, com $gap \leq 1\%$ para todos os pontos. Para melhor visualização do *trade-off* entre tarefas de constelação e individuais, o ponto no qual A tem valor máximo (Figura 15) e o ponto no qual B tem valor máximo (Figura 16), respectivamente, foram investigados.

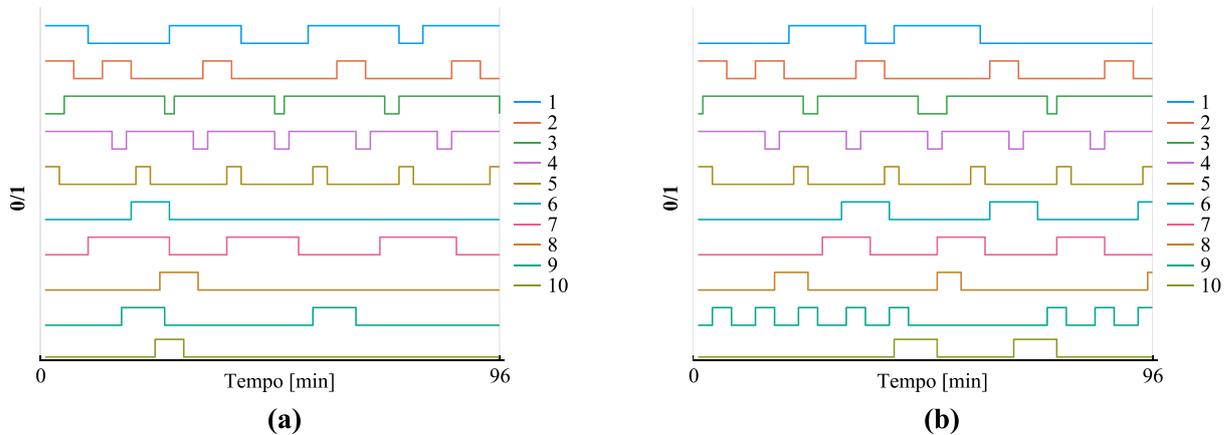
Figura 14 – Resultado do cenário Cnr2.1. Fronteira de Pareto (A e B)



Fonte: Autoria própria.

No ponto extremo que favorece a realização de tarefas coletivas (Figura 15), observou-se que as inicializações das tarefas de 2 a 5 atingiram o valor máximo possível. Para as tarefas 2 e 3, o limite foi definido por $y_{s,2}^{max} = 5$ e $y_{s,3}^{max} = 4 \forall s$. As tarefas 4 e 5 atingiram o máximo de execuções considerando a relação entre a duração total da órbita ($T = 96 \text{ minutos}$) e os tempos mínimos entre inicializações $p_{s,4}^{min} = 17 \forall s$ e $p_{s,5}^{min} = 18 \forall s$. A tarefa 1 foi a única a não atingir o máximo de execuções em ambos os satélites: no CubeSat 1, o limite, definido por $p_{s,1}^{min} = 22 \forall s$, foi alcançado; no CubeSat 2, o limite não foi atingido devido à grande quantidade de energia demandada por esta tarefa ($q_{s,1} = 2,81 \text{ W} \forall s$), e aos requisitos mínimos das tarefas individuais deste satélite.

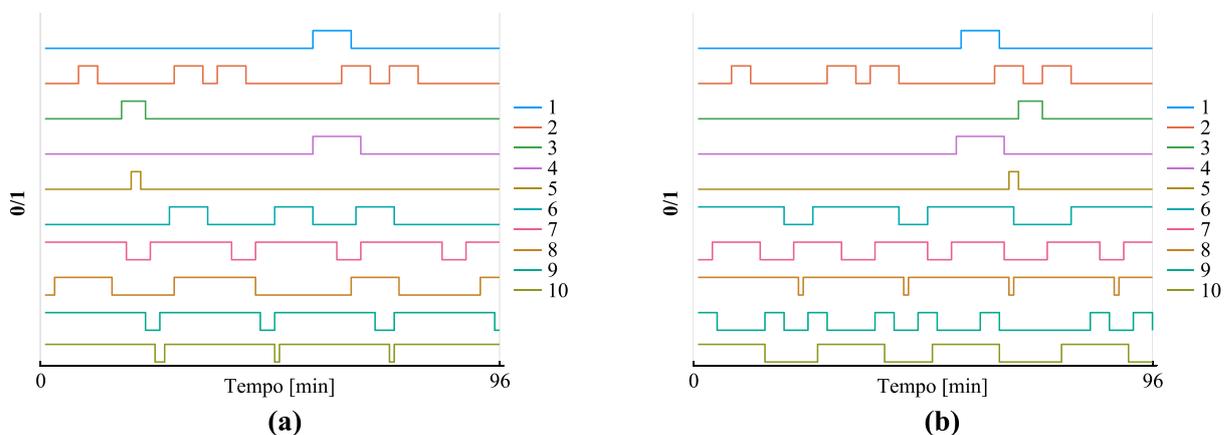
Figura 15 – Resultado do cenário Cnr2.1. Escalonamento ótimo dos satélites 1 (a) e 2 (b) quando as tarefas coletivas (A) são maximizadas



Fonte: Autoria própria.

De maneira similar ao escalonamento previamente descrito, este (Figura 16), atingiu limites máximos de execuções de tarefas, entretanto, neste caso foram maximizadas as tarefas individuais de cada satélite. No CubeSat 1, os limites foram definidos pelos parâmetros: $y_{1,6}^{max} = 3$, $p_{1,7}^{min} = 22$, $p_{1,8}^{min} = 24$, $y_{1,9}^{max} = 4$ e $p_{1,10}^{min} = 24$. Já no CubeSat 2: $p_{2,6}^{min} = 24$, $p_{2,7}^{min} = 16$, $y_{2,8}^{max} = 5$, $y_{2,9}^{max} = 8$ e $p_{2,10}^{min} = 24$.

Figura 16 – Resultado do cenário Cnr2.1. Escalonamento ótimo dos satélites 1 (a) e 2 (b) quando as tarefas individuais (B) são maximizadas



Fonte: Autoria própria.

A fronteira de Pareto e os escalonamentos referentes aos dois pontos extremos, em conjunto, são capazes de prover, para o tomador de decisão, uma boa noção da capacidade e dos limites da constelação, de forma a possibilitar uma escolha adequada da melhor proporção entre atividades coletivas e individuais, a depender dos objetivos da missão. Em comparação com o resultado do cenário Cnr1.1, em destaque na Figura 14, pode-se constatar que a maximização de $A+B$, sem abordagem multiobjetivo, não proporciona flexibilidade, pois, ao fornecer somente um ponto da fronteira de Pareto, não consegue representar missões com diferentes perfis. A abordagem multiobjetivo, por conseguinte, adiciona conhecimento sobre as

soluções ótimas factíveis e sobre as direções para as quais o operador pode direcionar o planeamento da missão, em prol de A ou B.

5.2.2 Constelação de três satélites (Cnr2.2)

A segunda parte do cenário Cnr2 obteve a fronteira de Pareto em uma constelação com três CubeSats 3U (Quadro 11) para fins de comparação com o resultado encontrado no cenário anterior Cnr2.1

Quadro 11 – Síntese da implementação Cnr2.2

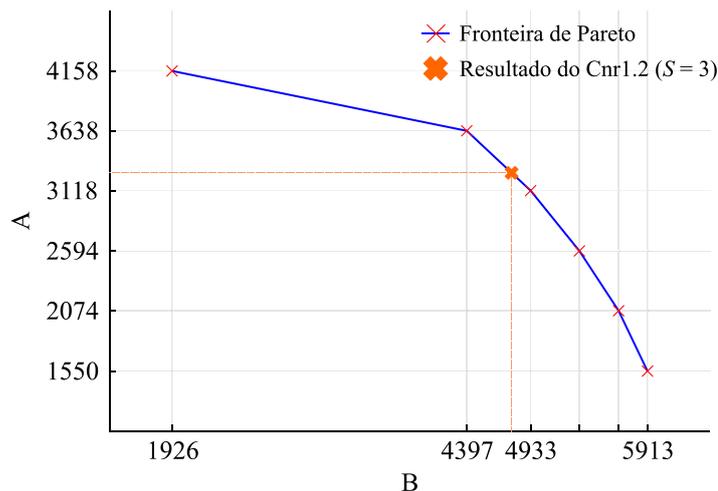
Tamanho da constelação (S)	3
Tarefas	5 Coletivas (1 síncrona) 15 Individuais (3x5)
Objetivo(s)	Ótimo de Pareto: max A, max B (eq. 10)
Saída(s) da implementação	Fronteira de Pareto (A e B; 6 pontos)

Fonte: Autoria própria.

5.2.2.1 Resultados

Conforme estimado pelos resultados do cenário Cnr1.2, o aumento da quantidade de CubeSats na constelação – de 2 em Cnr2.1, para 3 em Cnr2.2 – elevou os valores alcançados por ambos os objetivos (A e B) em todos os seis pontos da fronteira de Pareto (Figura 17). Em comparação com a Figura 14, é notório que, mesmo com valores distintos, a curva manteve o formato.

Figura 17 – Resultado do cenário Cnr2.2. Fronteira de Pareto (A e B)



Fonte: Autoria própria.

5.3 A, B E C, SEM ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO (CNR3)

No cenário Cnr3, o termo de redundância (C) é introduzido na função objetivo juntamente com um peso ω_C . Em todas as partes deste cenário foram consideradas pertencentes

ao grupo de tarefas com redundância encorajada (\mathcal{R}) todas as tarefas de constelação (\mathcal{C}), com exceção da única tarefa definida como síncrona (\mathcal{E}).

5.3.1 Exemplo inicial ilustrativo (Cnr3.1)

Para a primeira parte do cenário Cnr3, foram simulados os mesmos conjuntos de tarefas de Cnr1.1, e os parâmetros da implementação foram constantes (Quadro 12). A simulação – de uma constelação de dois CubeSats – teve como saída os escalonamentos ótimos e balanços energéticos dos satélites.

Quadro 12 – Síntese da implementação Cnr3.1

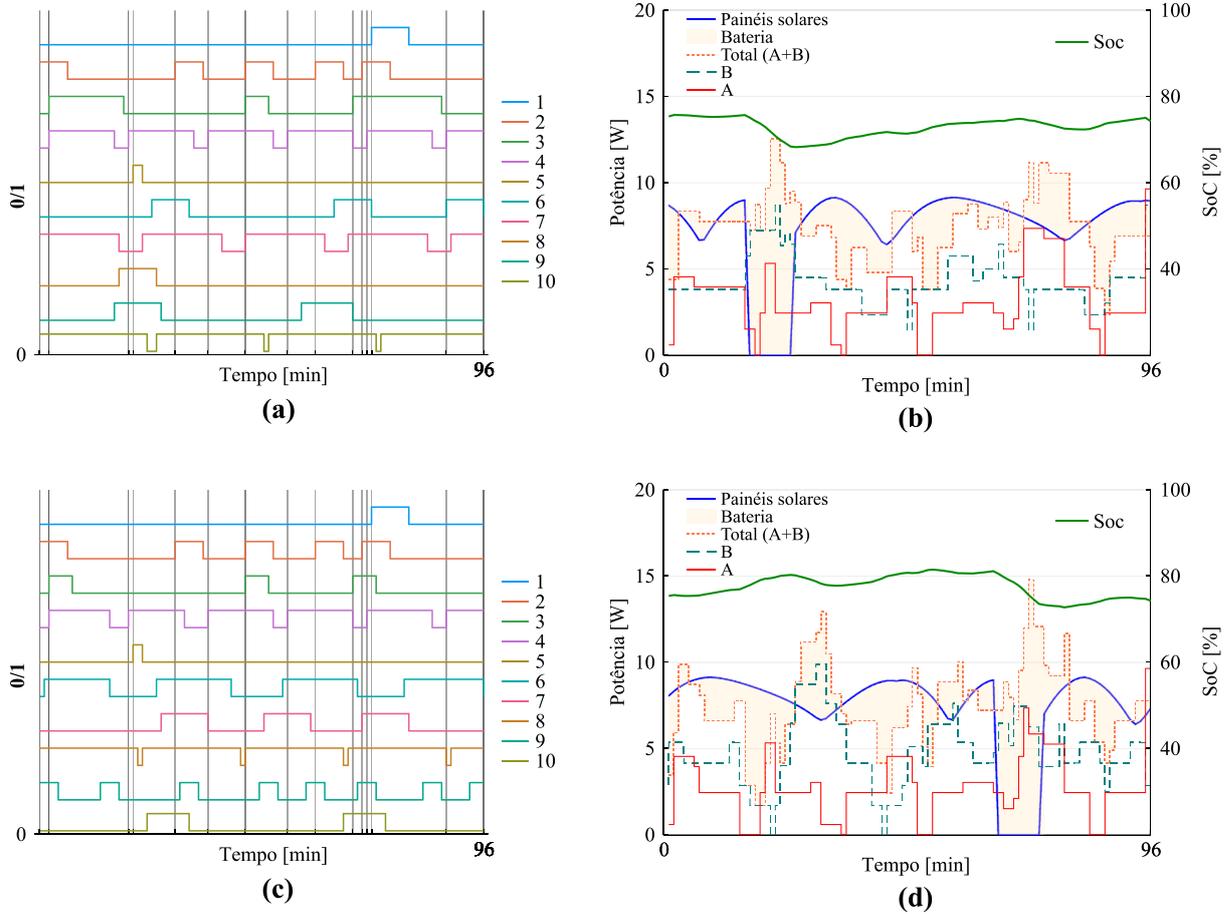
Tamanho da constelação (S)	2
Tarefas	5 Coletivas (1 síncrona + 4 com redundância encorajada) 10 Individuais (2x5)
Objetivo(s)	max $A + B + \omega_C C$ (eq. 10)
Peso ω_C	10
Saída(s) da implementação	2 Escalonamentos ótimos (1 por satélite); 2 Balanços energéticos (1 por satélite)

Fonte: Autoria própria.

5.3.1.1 Resultados

O termo de redundância encorajada (C) induz um comportamento, nas tarefas de constelação, de tolerância a falhas. Os resultados do cenário Cnr3.1, exibidos na Figura 18 e comparáveis aos do cenário Cnr1.1 (Figura 12), mostram que a inserção de C à função objetivo motivou a inicialização redundante (indicada, na Figura 18, por linhas verticais) de todas as tarefas de constelação, sem alterar as quantidades de realizações das tarefas individuais de nenhum dos CubeSats e sem gerar impactos significativos nos balanços de energia (Figura 18b e Figura 18d).

Figura 18 – Resultados do cenário Cnr3.1. (a, c) Escalonamentos ótimos e (b, d) balanços de energia dos satélites 1, 2



Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Variação no peso da redundância encorajada (Cnr3.2)

A segunda parte do cenário Cnr3 avaliou o impacto da variação do peso da redundância encorajada (ω_C) sobre os valores de A, B e C; e sobre o tempo de resolução do problema pelo *solver*. O Quadro 13 sintetiza os parâmetros utilizados nesta implementação.

Quadro 13 – Síntese da implementação Cnr3.2

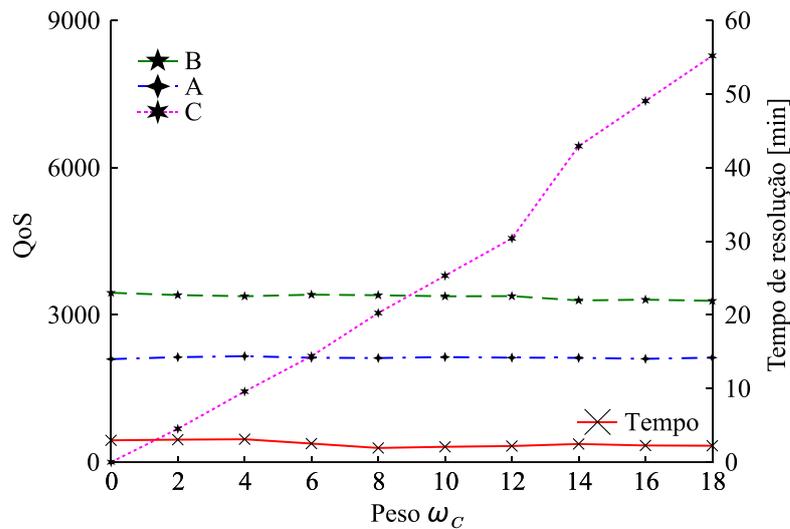
Tamanho da constelação (S)	2
Tarefas	5 Coletivas (1 síncrona + 4 com redundância encorajada) 10 Individuais (2x5)
Objetivo(s)	max A + B + $\omega_C C$ (eq. 10)
Peso ω_C	0, 1, 2, ..., 18 (variável)
Saída(s) da implementação	A, B e C em função de ω_C ; Tempo de resolução em função de ω_C

Fonte: Autoria própria.

5.3.2.1 Resultados

A simulação deste cenário permite constatar que o aumento do peso ω_C beneficia a tolerância a falhas da constelação, representada pelo temo C, ao tornar redundante a execução das tarefas coletivas sem gerar grandes alterações, positivas ou negativas, nos demais objetivos (A e B) e sem afetar significativamente a complexidade da simulação, fato evidenciado pela pouca variação do tempo de execução na Figura 19.

Figura 19 – Resultados do cenário Cnr3.3. QoS (individual, coletiva e redundante) e tempo de resolução em função do peso ω_C



Fonte: Autoria própria.

5.3.3 Variação do tamanho da constelação (Cnr3.3)

Em Cnr3.3, o valor de S foi variado para que fosse avaliada a influência do tamanho da constelação sobre A, B e C; e sobre o tempo de resolução do problema pelo *solver* (Quadro 14).

Quadro 14 – Síntese da implementação Cnr3.3

Tamanho da constelação (S)	1*, 2, 3, 4, 5 (variável)
Tarefas	5 Coletivas (1 síncrona + 4 com redundância encorajada) 5, 10, 15, 20, 25 Individuais ($S \times 5$)
Objetivo(s)	$\max A + B + \omega_C C$ (eq. 10)
Peso ω_C	10
Saída(s) da implementação	A, B e C em função de S ; Tempo de resolução em função de S

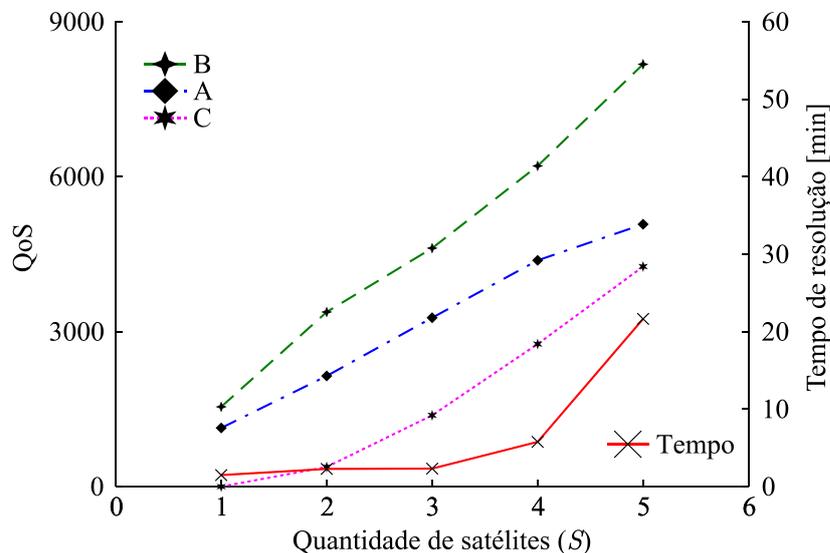
*Não configura constelação, mas foi simulado para melhor ilustrar o impacto de S em C

Fonte: Autoria própria.

5.3.3.1 Resultados

A comparação dos resultados deste cenário (Figura 20) com os de Cnr1.2 (Figura 13) reforça a observação apresentada em 5.3.2.1 no que tange o efeito do termo C sobre os demais termos da função objetivo (A e B), nota-se que a influência é mínima considerando as grandezas envolvidas na análise, havendo uma diferença máxima de -3,5% no valor de B (para $S = 3$) e -2,3% em A+B (para $S = 4$). Entretanto, é possível observar um aumento na dificuldade de resolução do problema, transparecido pela maior inclinação da curva de tempo, quando comparada à da Figura 13. Isto ocorre porque o termo C acrescenta ao problema mais uma variável de decisão, com dois subíndices dependentes do tamanho da constelação ($\beta_{s,s',j,t}$); sendo assim, a repercussão do incremento de S é ainda maior do que a observada em Cnr1.2.

Figura 20 – Resultados do cenário Cnr3.3. QoS (individual, coletiva e redundante) e tempo de resolução em função da quantidade de satélites na constelação



Fonte: Autoria própria.

5.4 CONSIDERAÇÕES

Três cenários foram simulados, que avaliaram, separadamente: a utilização do modelo na solução do problema considerando a maximização da QoS da missão como um todo, sem distinção de tipos de tarefas (Cnr1); a obtenção de informações de *trade-off* entre tarefas individuais e coletivas, por meio da análise multiobjetivo da fronteira de Pareto do problema (Cnr2); e a inclusão de um termo, na função objetivo, que encoraja a redundância nas tarefas de constelação (Cnr3). Ressaltam-se, acerca dos resultados, os seguintes aspectos:

- Escalonamentos ótimos e balanços de energia condizentes com as propriedades das constelações e das tarefas.
- Aumento do tempo de resolução associado ao incremento de satélites na constelação, com tendência exponencial.
- Tendência da QoS de tarefas coletivas um platô, quando o incremento de satélites não acompanha incremento nas tarefas de constelação.

- Fronteira de Pareto com informações capazes de auxiliar na análise de *trade-off* entre tarefas individuais e coletivas.
- Influência pouco relevante do termo de redundância sobre a QoS de tarefas individuais e coletivas – inferior a 2,5% –, em comparação à não inclusão deste termo.
- Aumento na dificuldade de resolução do problema quando considerado o termo de redundância encorajada, com tendência exponencial mais acentuada em comparação a quando este termo não é levado em conta.

O Quadro 15 sumariza os prós e contras da abordagem tratada em cada cenário.

Quadro 15 – Comparativo entre as abordagens

Cenário	Prós	Contras
Cnr1 (Seção 5.1) max A + B	O tempo de resolução, para uma constelação com S satélites, é inferior em comparação com as demais abordagens.	Não fornece ao operador da ferramenta conhecimento sobre toda a região de soluções ótimas factíveis.
Cnr2 (Seção 5.2) max [A , B]	Fornece, ao tomador de decisões, flexibilidade no planejamento da missão, possibilitando que o escalonamento escolhido considere diferentes proporções entre QoS coletiva e individual.	Maior tempo necessário para resolução do problema (cerca de $i+1$ vezes o tempo necessário para a resolução com a abordagem do Cnr1, onde $i+1$ é a quantidade de pontos desejada pelo operador para a fronteira de Pareto).
Cnr3 (Seção 5.3) max A + B + $\omega_c C$	Ao encorajar que as tarefas coletivas sejam inicializadas com redundância, aumenta a confiabilidade da missão.	O acréscimo da variável $\beta_{s,s',j,t}$ torna o tempo de resolução do problema mais sensível ao aumento na quantidade de satélites da constelação.

Fonte: Autoria própria.

A comparação entre as abordagens de cada cenário revela que o planejamento de uma missão pode ser mais bem fundamentado quando considerada a abordagem do cenário Cnr2, visto que esta fornece a fronteira de Pareto com uma representação de todas as soluções ótimas factíveis do problema multiobjetivo, estando incluso o ponto no qual a soma da QoS coletiva com a individual (A+B) é maximizada, ponto este, que, no Cnr1, é a única saída. A abordagem do cenário Cnr3 pode ser utilizada individualmente ou como uma etapa no processo de decisão, e mostra-se interessante para aplicações que requerem maior confiabilidade.

Para garantir que, independente da resolução (quantidade de pontos) escolhida para a fronteira de Pareto, esteja incluso na análise um ponto que maximiza A+B, pode-se acrescer a maximização de A+B ao método descrito na Figura 10, como um passo prévio.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento de missões espaciais envolvendo constelações de pequenos satélites é complexo e desafiador, pois precisa considerar as limitações e as capacidades dos satélites, individualmente, e da constelação, como um coletivo. Para que o máximo proveito seja extraído, é importante que o tomador de decisão seja capaz de compreender as possibilidades de gerenciamento dos recursos energéticos escassos e alinhar suas escolhas de acordo com os objetivos da missão. Neste sentido, esta pesquisa se propôs a, com base no estado-da-arte sobre otimização multiobjetivo, desenvolver um modelo para escalonamento de tarefas direcionado a constelações de *Smallsats*, capaz de maximizar a qualidade de serviço e aumentar a confiabilidade do sistema multi-satélite.

O modelo proposto representa as principais características e dificuldades deste tipo de missões através de restrições de: manejo de energia disponível; tarefas com prioridades dinâmicas, requisitos quantitativos de inicializações, propriedades de tempo de execução, além da possibilidade de simultaneidade ou redundância entre múltiplos satélites. Sem perda de generalidade, um modelo de fluxo de irradiação – para CubeSats – foi implementado na simulação de três cenários envolvendo constelações de CubeSats 3U. Os cenários levaram em consideração missões com diferentes quantidades de satélites e simularam as possibilidades de análise multiobjetivo e de redundância encorajada, o que reforçou a vasta aplicabilidade e adaptabilidade do modelo considerando requisitos distintos.

Dentro dos cenários simulados, o modelo conseguiu gerar resultados em tempo hábil – inferior à duração de uma órbita –, alcançando duração máxima pouco superior a 20 minutos em um cenário com órbita de 96 minutos, 05 CubeSats e 25 tarefas, sendo 05 delas coletivas, com redundância estimulada. As simulações mostraram que o encorajamento de redundância em tarefas coletivas, afeta o tempo de resolução devido ao aumento de complexidade, principalmente em simulações com mais satélites, tendo alcançado um aumento de 83% no tempo de resolução de uma instância com 5 CubeSats e 30 tarefas (sendo 5 coletivas). Apesar disso, a inclusão do termo C não interfere de forma significativa na qualidade de serviço das tarefas individuais, nem das de constelação, tendo sido a maior variação da QoS total ($A+B$) em torno de -2,3%.

As simulações também mostraram que o modelo, ao gerar, para um problema, a representação da fronteira de Pareto com uma quantidade especificada de pontos e os escalonamentos ótimos correspondentes aos pontos extremos, fornece informações que podem contribuir significativamente para tomadas de decisão relativas ao *trade-off* entre as tarefas individuais e as coletivas. Neste sentido, a fronteira de Pareto, que inclui a solução do problema de maximização de QoS total ($A+B$), é, em termos de informação, muito superior à maximização simplificada da soma dos objetivos, que fornece um único ponto ótimo.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de métodos que possam tornar o processo de resolução menos custoso computacionalmente, mantendo a exatidão da solução, como a decomposição da formulação, acompanhada do uso de um método *branch and price*, visando a tratabilidade de problemas maiores em tempo muito inferior à duração da órbita. Além disso, pode-se considerar uma reformulação do problema considerando a inclusão de outras técnicas de otimização multicritério.

REFERÊNCIAS

- BANDYOPADHYAY, S. et al. Review of Formation Flying and Constellation Missions Using Nanosatellites. **Journal of Spacecraft and Rockets**, 53, 2016. 567-578.
- BEZANSON, J. et al. Julia: A fresh approach to numerical computing. **SIAM Review**, v. 59, p. 65–98, 2017. Disponível em: <<https://epubs.siam.org/doi/10.1137/141000671>>.
- BRYCE SPACE AND TECHNOLOGY. **Smallsats by the Numbers**. [S.l.]. 2020.
- CAL POLY SLO; JOHNSTONE, A. **CubeSat Design Specification Rev. 14**, 2020. Disponível em: <cubesat.org>.
- CAMPS, A. Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions. In: DEMYANOV, V.; BECEDAS, J. **Satellites Missions and Technologies for Geosciences**. Londres: IntechOpen, 2019.
- CHEN, X. et al. A mixed integer linear programming model for multi-satellite scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 275, p. 694-707, 2019. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221718309998>>.
- CHO, D.-H. et al. Optimization-Based Scheduling Method for Agile Earth-Observing Satellite Constellation. **Journal of Aerospace Information Systems**, v. 15, p. 611-626, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.2514/1.I010620>>.
- COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**. 2a. ed. Nova York: Springer, 2007.
- CUI, J.; ZHANG, X. Application of a Multi-Satellite Dynamic Mission Scheduling Model Based on Mission Priority in Emergency Response. **Sensors**, v. 19, 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1430>>.
- EHRGOTT, M. **Multicriteria Optimization**. 2a. ed. Nova Zelândia: Springer, 2005.
- GROSSMANN, I. E.; LEE, S. Generalized Convex Disjunctive Programming: Nonlinear Convex Hull Relaxation. **Computational Optimization and Applications**, 26, 2003. 83-100.
- HASAN, M.; AREFIN, R. Application of Linear Programming in Scheduling Problem. **Dhaka University Journal of Science**, Dacca, 65, 2017. 145-150.
- HE, L. et al. Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment. **Advances in Space Research**, v. 63, p. 897-912, 2019. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117718307762>>.
- JIA, X. et al. Collaborative Data Downloading by Using Inter-Satellite Links in LEO Satellite Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, p. 1523-1532, 2017.
- KØRVELL, A.; DEGN, K. **Designing a Tool-Chain For Generating Battery-Aware Contact Plans Using UPPAAL**. Aalborg: Aalborg University, 2019.

- LI, J. et al. A Brief Review of High Efficiency III-V Solar Cells for Space Application. **Frontiers in Physics**, v. 8, 2021. ISSN 2296-424X. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphy.2020.631925>>.
- MARCELINO, G. M. et al. In-orbit preliminary results from the open-source educational nanosatellite FloripaSat-I. **Acta Astronautica**, 188, 2021. 64-80.
- MARTINCIC, F.; SCHWIEBERT, L. Introduction to Wireless Sensor Networking. In: STOJMENOVIC, I. **Handbook of Sensor Networks**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. p. 1-40.
- MAVROTAS, G. Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. **Applied Mathematics and Computation**, 2009. p. 455-465.
- MICHAELIS. **Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. [S.l.]: Editora Melhoramentos Ltda., 2015. ISBN 978-85-06-04024-9.
- MONMOUSSEAU, P. Scheduling of a Constellation of Satellites: Creating a Mixed-Integer Linear Model. **Journal of Optimization Theory and Applications**, v. 191, p. 846-873, 2021. ISSN 1573-2878. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10957-021-01875-2>>.
- MORSCH FILHO, E. **A Coupled Irradiance - Thermal 3D Numerical Framework for Simulation of CubeSats**. Florianópolis: UFSC (Doutorado em Engenharia Mecânica), 2021. 126 p.
- MORSCH FILHO, E. et al. A comprehensive attitude formulation with spin for numerical model of irradiance for CubeSats and Picosats. **Applied Thermal Engineering**, v. 168, p. 114859, 2020. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119333459>>.
- MURTY, K. G. Linear Programming. In: _____ **Operations Research and Management Science Handbook**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. Cap. I-1, p. 1-31.
- NASA. **CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers**. [S.l.]: California Polytechnic State University (Cal Poly), 2017.
- NASA. **State-of-the-Art: Small Spacecraft Technology**. Mountain View: NASA, 2021. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa>>.
- NGATCHOU, P.; ZAREI, A.; EL-SHARKAWI, M. A. Pareto Multi Objective Optimization. **Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems**, 2005. p.84-91.
- POGHOSYAN, A.; GOLKAR, A. CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 88, p. 59-83, 2017. ISSN 0376-0421. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116300951>>.

RAVINDRAN, A. R. (Ed.). **Operations research and management science handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-9721-9.

RIGO, C. A. et al. A nanosatellite task scheduling framework to improve mission value using fuzzy constraints. **Expert Systems with Applications**, 175, 2021.

RIGO, C. A. et al. Task scheduling for optimal power management and quality-of-service assurance in CubeSats. **Acta Astronautica**, 179, 2021. 550-560.

ROCCO, E. M.; SOUZA, M. L. D. O. E.; PRADO, A. F. B. D. A. **Multi-Objective Optimization Applied to Satellite Constellation I: Formulation of the Smallest Loss Criterion**. 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. [S.l.]: [s.n.]. 2003.

SHKOLNIK, E. L. On the verge of an astronomy CubeSat revolution. **Nature Astronomy**, v. 2, p. 374–378, maio 2018. ISSN 2397-3366. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41550-018-0438-8>>.

SLONGO, L. K. et al. Energy-driven scheduling algorithm for nanosatellite energy harvesting maximization. **Acta Astronautica**, v. 147, p. 141-151, 2018. ISSN 0094-5765. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517306318>>.

SPACEWORKS ENTERPRISES. **Nano/MicroSatellite Market Forecast 10th Edition**. [S.l.]. 2020.

SWARTWOUT, M. **CubeSat Database**, 2019. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/home/cubesat-database>>.

VANDERBEI, R. J. **Linear Programming: Foundations and Extensions**. 4^a. ed. Nova York: Springer, 2014. ISBN 0884-8289.

WOLSEY, L. A. **Integer Programming**. 2^a. ed. Nova York: Wiley, 2020. ISBN 9781119606536.