LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO PARA *DOWNLOAD* DE DADOS OBTIDOS POR MÚLTIPLOS SATÉLITES PARA MÚLTIPLAS ESTAÇÕES DE SOLO: NOVA ABORDAGEM

Maria José Pinto
Instituto de Estudos Avançados (IEAv)
Trevo Cel Av José A. A. do Amarante, 1, Putim, 12228-001, São José dos Campos, SP
mariajosemjp@fab.mil.br

Hiawata Pola, Mischel Carmen Neyra Belderrain
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos, SP
hiawata.pola@ga.ita.br, mischel.carmen@ga.ita.br

Ana Cláudia I. Hayashi, Tahisa N. Kuck, Élcio H. Shiguemori
Instituto de Estudos Avançados (IEAv)
Trevo Cel Av José A. A. do Amarante, 1, Putim, 12228-001, São José dos Campos, SP
anaclaudiaacih@fab.mil.br, tahisatnk@fab.mil.br, elcioehs@fab.mil.br

RESUMO

Este trabalho busca otimizar o planejamento para o *download* de múltiplos satélites para múltiplas estações de solo, em um horizonte de planejamento pré-definido. Uma nova estratégia para modelar o problema está sendo proposta para obter uma formulação mais compacta em relação ao modelo matemático proposto anteriormente. Além disso, novas adaptações foram incluídas para considerar que o descarregamento dos dados armazenados nos satélites pode ser feito em pacotes como no modelo anterior, mas agora de tamanhos variáveis a serem definidos pela otimização. Para garantir a transição entre um satélite e outro, em casos onde existam janelas de visibilidade sobrepostas, novas restrições também foram incluídas para tratar casos de sobreposição, mas agora quando um mesmo satélite pode descarregar para diferentes estações de solo desde que o descarregamento iniciado antes tenha sido finalizado. O modelo foi aplicado em alguns casos de testes e os resultados obtidos serão apresentados.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento para *Download* de Dados, Formulação Matemática, Múltiplos Satélites e Múltiplas Estações de Solo.

PO em Defesa e Segurança Pública (D&SP), Outras Aplicações em PO (OA), Logística e Transporte (L&T)

ABSTRACT

This work aims to optimize the data download scheduling problem for multiple satellites to multiple ground stations, within a pre-defined planning horizon. A new strategy for modelling the problem is being proposed to obtain a more compact formulation in relation to the previously proposed mathematical model. Furthermore, new adaptations were included to consider that the download of the data stored on satellites can be done in packets as in the previous model, but now with variable sizes to be defined by the optimization. To guarantee the transition between a satellite to another in cases where there are overlapping visibility time-windows, new constraints were also included to handle cases of overlap, but now when the same satellite can download to different ground stations provided that the download started before has been completed. The proposed model was applied in some instances and the results obtained will be presented.

KEYWORDS. Data Download Scheduling Problem. Mathematical Formulation. Multiple Satellites and Multiple Ground Stations.

OR in Defense and Public Security. Other OR Applications. Logistic and Transport

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

1. Introdução

O Brasil, por meio do Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), busca enfatizar suas prioridades em relação às atividades espaciais e seu interesse estratégico no domínio das tecnologias nesta área, visando fortalecer a autonomia e a soberania nacional [AEB 2012]. No contexto da Defesa, por sua vez, foi criado o Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), responsável por definir as diretrizes e a estrutura para o desenvolvimento e implantação dos sistemas espaciais [BRASIL 2018]. Além disso, o emprego de satélites em diversos cenários de atuação vem se consolidando como uma realidade e norteado as pesquisas aplicadas dentro deste contexto, dado o enorme potencial de expansão para novos papéis, tanto no âmbito da Defesa como em aplicações no meio civil. O país se encontra em estágio emergente em termos de gerenciamento, desenvolvimento e emprego de tecnologias de sistemas espaciais e, com isto, torna-se fundamental a realização de pesquisas visando o desenvolvimento de ferramentas e metodologias que contribuam para ampliar o nível de consciência situacional e reduzir o tempo de resposta dos decisores dentro do contexto espacial.

Buscando contribuir com essas pesquisas, este trabalho visa auxiliar o processo de tomada de decisão quanto ao planejamento otimizado para o *download* de dados, considerando múltiplos satélites e múltiplas estações de solo, em um horizonte de planejamento desejado. Para isto, um modelo matemático é proposto baseado no modelo proposto anteriormente [Pinto *et al.* 2023], onde novas restrições identificadas serão incluídas e uma nova forma de representar o problema será proposta.

A próxima seção apresenta uma breve revisão da literatura incluindo as contribuições deste trabalho. Na Seção 3, o novo modelo proposto é apresentado e, na Seção 4, o modelo matemático é aplicado em alguns casos de testes para mostrar a sua aplicabilidade. Na Seção 5, algumas considerações finais e propostas de trabalhos futuros são apresentadas.

2. Revisão da Literatura e Contribuições

Os estudos referentes ao planejamento de tarefas em dispositivos espaciais vêm crescendo ao longo da última década, especificamente, o planejamento para o *download* de satélites é abordado basicamente como um problema de *scheduling*, onde os cenários operacionais estudados divergem quanto ao foco da otimização e as restrições consideradas. De forma geral, a função objetivo está relacionada à maximização da quantidade de dados transmitidos com êxito às estações de solo, em um horizonte de planejamento.

Os métodos utilizados para solucioná-lo, por sua vez, se mostram também heterogêneos entre os autores. Independentemente do tipo de missão a ser executada, busca-se inserir o máximo de tarefas nos períodos em que os satélites possuem oportunidade de contato com as estações de solo (janelas de visibilidade para *download*), tanto para recepção, quanto para transmissão de dados. Em [Barbulescu *et al*. 2002], os resultados de uma heurística gulosa com busca local e um Algoritmo Genético (GA, do inglês *Genetic Algorithm*) são comparados para otimização do planejamento das comunicações entre satélites e estações de solo gerenciados pelo Centro de Controle de Satélites da Força Aérea Americana. Em [Xhafa *et al*. 2013], o desempenho de uma variação de um GA é avaliado, para instâncias de um problema genérico de planejamento para estações de solo, onde também são considerados múltiplas estações, múltiplos satélites, inserido em um horizonte de planejamento. Os autores apresentam a perspectiva de solução para diferentes objetivos do problema, como maximizar a quantidade de acessos entre os satélites e as estações, maximizar o tempo de utilização das estações no horizonte de planejamento, minimizar a quantidade de sobreposições entre as janelas para *download*, ou ainda, maximizar a utilização de cada janela de visibilidade no planejamento.

Em [Castaing 2014] uma metodologia de resolução intitulada MMSP (do inglês, *Multiple-Satellite, Multiple Ground Station Scheduling Problem*) é proposta. O autor utiliza uma abordagem determinística para analisar diferentes instâncias para o número de satélites, de estações de solo e de janelas de visibilidade para *download*. O objetivo é maximizar a quantidade de dados entregue às estações de solo dentro do horizonte de planejamento. São consideradas restrições de

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

energia necessárias para a execução das tarefas; que os dados podem ser descarregados de maneira intermitente, ou seja, em pacotes parciais; que a eficiência de transmissão dos dados varia ao longo das janelas; que existe uma capacidade limite de armazenamento de dados para cada satélite; e, que há uma coleta contínua de dados e energia ao longo da operação. Sob esse aspecto, o planejamento deve, portanto, responsabilizar-se também por garantir uma utilização eficiente do armazenamento de dados no satélite, ao passo que garante a possibilidade de aquisição de novas imagens. Um problema semelhante é estudado por [Spangelo *et al.* 2015] considerando apenas um satélite, mas com o incremento de parâmetros relacionados à quantidade de dados que podem ser perdidos ao longo da operação por não serem descarregados às estações de solo, além de uma modelagem mais robusta da dinâmica de aquisição e consumo de energia do satélite. É analisado o desempenho das técnicas de *branch-and-bound* para solução da formulação proposta. Uma variação do problema considerando prioridades diferentes para imagens já adquiridas que deverão ser descarregadas para múltiplas estações é apresentada em [Karapetyan *et al.* 2015], onde os autores exploram o problema contendo um satélite e várias estações, cujo objetivo é minimizar o atraso de execução de todos os *downloads* em um horizonte de planejamento de 24h. Trabalho semelhante é realizado por [Song *et al*. 2018] onde o objetivo, por sua vez, é maximizar a quantidade de imagens descarregadas integralmente, sem possibilidade de repartição, considerando ainda haver um custo de operação diferente entre as estações, penalizando a mais custosa no agendamento. Em ambos os trabalhos são aplicadas heurísticas construtivas gulosas associadas à meta-heurísticas para a busca de soluções.

Alguns trabalhos da literatura mostram a necessidade de buscar a eficiência do planejamento, de forma a respeitar protocolos internacionais de armazenamento e descarregamento de dados, denominados SPP (do inglês, *Space Packet Protocol*). Esses protocolos são emitidos pelo CCSDS (do inglês, *Consultative Committee for Space Data Systems*) visando maior interoperabilidade, eficiência e confiabilidade nas comunicações e trocas de dados no espaço, ao definir a estrutura de empacotamento e fluxo desses dados [CCSDS 2020] e são utilizados pelas principais organizações do setor, como a NASA, ESA, Roscosmos e JAXA, onde os dados devem ser tramitados em pacotes, que podem ter comprimento variável.

Um dos primeiros trabalhos a tratar o problema desta forma foi o de [Marinelli *et al.* 2011], onde é desenvolvida uma heurística baseada em relaxação lagrangeana para maximizar a alocação dos pacotes de dados com prioridades distintas ao longo das janelas de acesso. A abordagem é implementada e utilizada pelo operador italiano do sistema de satélite GALILEO, fornecendo soluções próximas do ótimo para problemas em larga escala. Mais recentemente, [Pinto *et al.* 2023] também consideram que a fragmentação e o descarregamento das imagens, armazenadas nos satélites, seja feita em pacotes de dados. Além disso, o planejamento considera múltiplos satélites e múltiplas estações de solo e que o descarregamento dos alvos adquiridos por cada satélite é realizado dentro de um horizonte de planejamento e utilizando um conjunto de possíveis janelas de visibilidade para *download* (oportunidades de contato entre os satélites e as estações de solo). Um modelo matemático foi proposto para selecionar as janelas de visibilidade de forma a descarregar o máximo de dados dentro do horizonte de planejamento e de acordo com a prioridade e o *due time* dos alvos (último momento definido pelo usuário para que as imagens adquiridas estejam disponíveis na estação de solo). O modelo também garante que a duração do *download* respeite as respectivas janelas de visibilidade disponíveis e, o que não tem sido muito considerado na literatura, que o *download* para uma mesma estação de solo poderá ser realizado por diferentes satélites mesmo que as respectivas janelas possuam sobreposição ou estejam próximas, desde que o tempo de transição para que a estação alterne o recebimento de dados entre os diferentes satélites seja respeitado. Este trabalho agregou os fatores e requisitos citados em uma única formulação matemática para o problema e, do nosso conhecimento, o planejamento para *download* ainda não havia sido explorado sob os aspectos apresentados. Cabe ressaltar que a forma de modelar o problema e que resultou no modelo matemático proposto em [Pinto *et al.* 2023] foi baseada no modelo proposto e adaptado anteriormente em [Pinto *et al.* 2018, 2020].

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

A segmentação e empacotamento dos dados também é considerada em [Chang *et al.* 2023] em uma abordagem biobjetiva, onde buscam maximizar o sucesso de descarregamento das imagens completas maximizando o equilíbrio da utilização das janelas disponíveis. Estes autores denominam o problema DSIDSP (do inglês, *Dynamic Satellite Image Data Downlink Scheduling Problem*) e desenvolvem um algoritmo adaptativo de otimização biobjetiva (NSGA2ALNS), combinando a busca adaptativa por grandes vizinhanças (ALNS) com o algoritmo genético de ordenação não dominada II (NSGA-II).

Os trabalhos de [Marinelli *et al.* 2011] e [Pinto *et al.* 2023] consideram que a fragmentação e o descarregamento das imagens armazenadas nos satélites, seja feita em pacotes de dados, mas, nestes trabalhos, o tamanho dos pacotes são pré-definidos e não variáveis como define o protocolo emitido pelo CCSDS. Em [Chang *et al.* 2023], esta variação é considerada onde, inclusive, os autores destacam como a segmentação pode afetar a distribuição dos dados nas janelas de visibilidade, indicando a necessidade de abordar o problema sob a ótica da segmentação de dados, dado que não apenas fornece um melhor gerenciamento de armazenamento, mas também permite uma programação mais flexível e eficiente dos *downloads*.

Desta forma, a primeira contribuição deste trabalho é a adaptação do modelo proposto anteriormente em [Pinto *et al.* 2023], para considerar a segmentação variável dos pacotes, ou seja, agora o total de dados descarregados em uma determinada janela de visibilidade é uma variável de decisão do modelo e não um dado de entrada.

Além disso, como comentado anteriormente, o modelo anterior já considerava a existência de sobreposição ou proximidade das janelas de visibilidade, mas as restrições incluídas no modelo buscavam tratar esta limitação somente quando mais de um satélite pudessem descarregar seus dados para uma mesma estação de solo em períodos próximos ou sobrepostos. Entretanto, estas restrições também precisam ser modeladas quando um mesmo satélite pode descarregar seus dados para diferentes estações de solo para períodos sobrepostos. Desta forma, o modelo foi adaptado para incluir estas restrições.

Uma nova estratégia foi também proposta para modelar o problema, o que resultou num modelo mais compacto. O novo modelo matemático será apresentado em detalhes na próxima seção.

3. Formulação Matemática Proposta

O modelo matemático proposto busca atender algumas premissas e assume alguns aspectos do problema, como detalhado a seguir:

- Busca-se maximizar o total de alvos descarregados por completo durante o horizonte de planejamento, levando em consideração a prioridade de cada alvo. Por consequência, não serão permitidos descarregamentos parciais, ou seja, ou um alvo é totalmente descarregado ou não estará presente no planejamento.
- Os alvos podem ser particionados ao longo das janelas de visibilidade desde que respeitem a segmentação mínima e máxima específica de cada satélite, refletindo os protocolos CCSDS, mas também o descarregamento total de cada alvo antes do seu *due time*. Além disso, o tempo de processamento necessário para o descarregamento de todos os segmentos alocados em uma mesma janela não pode exceder a duração da respectiva janela.
- O tempo disponível de cada janela poderá ser considerado integralmente, pois assume-se que já foram descontados os períodos de menor eficiência de transmissão, que podem ocorrer no início e término das janelas de visibilidade;
- Cada alvo poderá ser descarregado apenas uma vez no planejamento;
- Tanto estações quanto satélites possuem exclusividade no serviço, ou seja, são capazes de receber/transmitir dados com um dispositivo por vez, resultando na necessidade de modelar restrições de sobreposição ou de proximidade;

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

- É considerado um tempo de transição (*setup*) para que a estação esteja pronta para receber dados de diferentes satélites. Neste trabalho, assume-se um valor fixo para cada estação, independente do satélite que estiver realizando o *download* de seus dados;
- Durante a passagem de um satélite, janelas sobrepostas de estações distintas podem ser utilizadas para o descarregamento. Mas, neste caso, assume-se que não é necessário contabilizar um tempo de transição para que o satélite alterne entre as diferentes estações por ser considerado um tempo não significativo. Desta forma, somente será necessário que a otimização defina o momento que o satélite irá alternar sua transmissão de uma estação para outra, garantindo assim uma transição viável;
- O modelo proposto irá tratar os casos de sobreposição ou proximidade descritos anteriormente, a cada par de janelas que possuem este tipo de condição.

Antes de apresentar o modelo proposto e, para facilitar o entendimento das novas variáveis e conjuntos incluídos ou renomeados, será descrita a nova estratégia para modelar o problema em relação ao modelo inicialmente apresentado em [Pinto *et al.* 2023]. Primeiramente, observamos que o modelo poderia ficar mais compacto em termos de quantidade de variáveis e conjuntos definidos. Para ilustrar melhor a estratégia utilizada, será primeiramente apresentada a forma como as variáveis de decisão foram definidas no modelo anterior e, em seguida, como serão modeladas no novo modelo.

Anteriormente, as variáveis de decisão do problema eram:

$y_{ikjgd} \in \{0,1\}$ → = 1, se os dados do *k*-ésimo pacote do alvo *i*, adquiridos pelo satélite *j*, forem descarregados para a estação de solo *g* usando a janela de visibilidade para *download d* ($i \in T$; $k=1,\ldots,MP_i$, $j \in ST_i$; $g \in GS_j$; $d \in D_{jg}$);
= 0, caso contrário

$DW_{ikjg} \geq 0$ → indica o momento que os dados do *k*-ésimo pacote do alvo *i*, adquiridos pelo satélite *j*, começarão a ser descarregados para a estação de solo *g* ($i \in T$; $k=1,\ldots,MP_i$, $j \in ST_i$; $g \in GS_j$)

onde:

W → Conjunto de janelas de visibilidade para *download* dos dados, ordenadas no tempo

T → Conjunto de alvos

S → Conjunto de satélites

ST_i → Conjunto de satélites que contém o alvo *i*, $i \in T$

G → Conjunto de estações de solo

GS_j → Conjunto de estações de solo que podem receber as informações coletadas pelo satélite *j*, $j \in S$

D_{jg} → Conjunto das janelas de visibilidade para *download* em que os dados adquiridos pelo satélite *j* podem ser descarregados para a estação de solo *g*, $j \in S$, $g \in GSj$

MP_i → Total de pacotes do alvo *i* que será descarregado para as estações de solo, ou seja: $MP_i = \left\lceil \frac{V_i}{Vmax} \right\rceil$, onde V_i representa o volume de dados do alvo *i* e *Vmax* representa o tamanho de cada pacote (em Mbits), $i \in T$

O uso do índice *k* na definição das variáveis de decisão no modelo anterior foi necessário pois, como comentado anteriormente, considerou-se que a fragmentação e o descarregamento dos dados armazenados nos satélites, seriam feitos em pacotes de dados de tamanho pré-definido *k*. Como agora este valor será uma decisão do modelo, as variáveis foram primeiramente redefinidas da seguinte forma:

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

$y_{ijgd} \geq 0$ → indica a quantidade de dados do alvo *i*, adquiridos pelo satélite *j*, será descarregada para a estação de solo *g* usando a janela de visibilidade para *download d* ($i \in T$; $j \in ST_i$; $g \in GS_j$; $d \in D_{jg}$);

$DW_{ijg} \geq 0$ → indica o momento que os dados do alvo *i*, adquiridos pelo satélite *j*, começarão a ser descarregados para a estação de solo *g* ($i \in T$; $j \in ST_i$; $g \in GS_j$)

Além disso, neste trabalho, estamos assumindo que o modelo matemático será utilizado para definir quando e para qual estação de solo os dados dos alvos, já coletados e armazenados pelos diferentes satélites, serão descarregados, ou seja, como ou quando os dados foram coletados não faz parte do escopo do problema tratado neste trabalho. Com isto, observe que não é necessário definir um conjunto de alvos e um conjunto de satélites, pois um alvo não pode estar em diferentes satélites. Da mesma forma, as janelas de visibilidade estão diretamente associadas às estações de solo e, com isto, também não é necessário definir um conjunto de janelas e um conjunto de estações de solo. Por consequência, as variáveis de decisão do modelo anterior podem ser redefinidas onde, para facilitar, o índice *j* indicará agora a janela de visiblidade e não mais o satélite, da seguinte forma:

$y_{ij} \geq 0$ → indica a quantidade de dados do alvo *i* será descarregada para a janela de visibilidade de *download j* ($i \in T$; $j \in WT_i$);

$DW_{ij} \geq 0$ → indica o momento que os dados do alvo *i* começarão a ser descarregados para a janela de visibilidade de *download j* ($i \in T$; $j \in WT_i$)

Com esta nova definição, a quantidade de conjuntos do modelo anterior será reduzida a dois conjuntos (*W* e *T*) e o conjunto GS_j pode ser renomeado para WT_i pois agora representa o conjunto de janelas de visibilidade que podem receber as informações coletadas pelo satélite que contém o alvo *i*, $i \in T$.

Para apresentar o novo modelo proposto, considere então a redefinição destes dados de entrada e dos demais necessários para a nova formulação onde algumas variáveis foram renomeadas, em relação ao modelo apresentado em [Pinto *et al.* 2023], para facilitar a compreensão do modelo.

H → Horizonte de planejamento

W → Conjunto de janelas de visibilidade para *download* dos dados, ordenadas no tempo

T → Conjunto de alvos

$p_i \geq 0$ → Prioridade do alvo *i*, $i \in T$

WT_i → Conjunto das janelas de visibilidade para *download* que os dados do alvo *i* podem ser descarregados, $i \in T$

TW_j → Conjunto dos alvos que podem ser descarregados nas janelas de visibilidade para *download j*, $j \in W$

$[b_j, \overline{b}_j]$ → Corresponde, respectivamente, ao horário inicial e final da *j*-ésima janela de visibilidade para *download* ($b_j, \overline{b}_j \in R^+$; $j \in W$)

DT_i → *Due time* para o alvo *i* ($DT_i \geq 0$), $i \in T$

V_i → Volume de dados do alvo *i*, $i \in T$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

SG → Taxa de descarregamento do satélite (volume de dados por segundo)

TP_i → Tempo de processamento para descarregar os dados do alvo *i*. Vamos assumir que o tempo de processamento para realizar o *download* dependerá, principalmente, do volume do dado a ser descarregado e da taxa de descarregamento do satélite. Com isto, teremos que: $TP_i = \frac{V_i}{SG}$

$[s_i, \bar{s}_i]$ → Corresponde, respectivamente, à segmentação mínima e máxima do satélite e, com isto, de cada alvo adquirido pelo respectivo satélite ($s_i, \bar{s}_i \in R^+; i \in T$)

TT_j → Corresponde ao tempo de transição (*setup*) necessário para que a estação que corresponde à janela de visibilidade para download *j* pare de receber dados de um satélite e passe a receber dados de outro satélite. Estamos assumindo que este tempo depende somente da estação de solo e não do satélite

OS → Corresponde à quantidade de pares de janelas sobrepostas ou próximas em que a mesma estação pode receber dados de diferentes satélites

OS1, *OS2* → Conjuntos formados, respectivamente, pela primeira e segunda janela do par (*j*, *r*) de janelas sobrepostas ou próximas em que uma mesma estação de solo pode receber os dados de diferentes satélites, sendo que a janela *j* receberá os dados do segundo satélite após o *download* do primeiro satélite terminar de descarregar na janela *r* (considerando que as janelas estão ordenadas no tempo)

OG → Corresponde à quantidade de pares de janelas sobrepostas em que mais de uma estação pode receber dados de um mesmo satélite

OG1, *OG2* → Conjuntos formados, respectivamente, pela primeira e segunda janela do par (*j*, *r*) de janelas sobrepostas ou próximas em que mais de uma estação pode receber dados de um mesmo satélite, sendo que a janela *j* receberá os dados após o *download* da janela *r* finalizar (considerando que as janelas estão ordenadas no tempo)

As variáveis de decisão descritas anteriormente são reapresentadas, com a inclusão de novas variáveis de decisão:

$y_{ij} \geq 0$ → indica a quantidade de dados do alvo *i* a ser descarregada para a janela de visibilidade de *download j* ($i \in T$; $j \in WT_i$);

$DW_{ij} \geq 0$ → indica o momento que os dados do alvo *i* começarão a ser descarregados para a janela de visibilidade de *download j* ($i \in T$; $j \in WT_i$)

$d_i \in \{0,1\}$ → = 1, se os dados do alvo *i* forem descarregados totalmente dentro do horizonte de planejamento, $i \in T$
= *0*, caso contrário

$z_{ij} \in \{0,1\}$ → = 1, se os dados (ou parte dos dados) do alvo *i* forem descarregados utilizando as janelas de visibilidade para *download j* ($i \in T$; $j \in WT_i$)
= *0*, caso contrário

O modelo proposto para gerar o planejamento para o *download* de dados é então apresentado a seguir.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

$$Max \sum_{i \in T} p_i d_i \quad (1)$$

s. a.:

$$\sum_{j \in WT_i} y_{ij} = TP_i d_i \qquad i \in T \quad (2)$$

$$y_{ij} \leq M z_{ij} \qquad i \in T, j \in WT_i \quad (3)$$

$$z_{ij} \leq y_{ij} \qquad i \in T, j \in WT_i \quad (4)$$

$$b_j z_{ij} \leq DW_{ij} \leq \bar{b}_j z_{ij} - y_{ij} \qquad i \in T, j \in WT_i \quad (5)$$

$$DW_{ij} + y_{ij} \leq DT_i \qquad i \in T, j \in WT_i \quad (6)$$

$$\sum_{j \in WT_i} y_{ij} \leq (\bar{b}_j - b_j) \qquad j \in W \quad (7)$$

$$s_i d_i \leq y_{ij} \leq \bar{s}_i d_i \qquad i \in T, j \in WT_i \quad (8)$$

$$DW_{ij} \geq \sum_{k \in TW_r} (DW_{kr} + y_{kr} + TT_r z_{kr}) + M(z_{ij} - 1) \qquad w = 1, \dots, OS, j \in OS2_w, r \in OS1_w, i \in TW_j \quad (9)$$

$$DW_{ij} \geq \sum_{k \in TW_r} (DW_{kr} + y_{kr}) + M(z_{ij} - 1) \qquad w = 1, \dots, OG, j \in OG2_w, r \in OG1_w, i \in TW_j \quad (10)$$

onde: *M* é um valor suficientemente grande (será considerado: *M = 2H*)

O objetivo do problema (1) consiste em maximizar a quantidade de dados descarregados completamente, de diferentes alvos adquiridos por diferentes satélites, de acordo com a prioridade. As variáveis de decisão definirão em que momento e, para qual janela de visibilidade, os dados de cada satélite serão descarregados e o total de dados descarregados em cada janela de visibilidade. As restrições (2) garantem que todos os pacotes de dados de cada alvo, descarregados em alguma janela de visibilidade, totalizarão o total de dados a ser descarregado e, desta forma, definem quais alvos serão totalmente descarregados, ou seja, definem as variáveis $d_i, i \in T$. As restrições (3) e (4) definem as variáveis z_{ij}, ($i \in T; j \in WT_i$) que serão diferentes de zero somente se algum pacote dos respectivos alvos for descarregado na respectiva janela, ou seja, $z_{ij} = 1$ somente se $y_{ij} > 0$. As restrições (5) garantem que o tempo total para *download* dos dados respeite os limites das respectivas janelas de visibilidade. As restrições (6) garantem que os dados adquiridos de cada alvo respeitem o respectivo *due time*, ou seja, serão transferidos para a estação de solo dentro do prazo solicitado. Ressalta-se que o valor de *due time*, considerado neste trabalho, contabiliza o tempo necessário para que a informação esteja disponível na estação de solo e não efetivamente disponível para o usuário final após o descarregamento destes dados para a estação de solo, o que inclui, por exemplo, o tempo para que os dados coletados estejam disponíveis no centro de processamento de dados e o tempo para o processamento destes dados. Desta forma, se o usuário solicitou a imagem de um determinado alvo para um horário *h* e for necessário *k* minutos para que seja feito todo o pós-processamento dos dados após seu descarregamento na estação de solo, será considerado que os dados deste alvo precisam ser descarregados para uma estação de solo até, no máximo, (*h-k*).

As restrições (7) foram incluídas para garantir que o total de dados descarregados em uma determinada janela de visibilidade sempre respeite o tamanho da respectiva janela e as restrições (8) garantem que a segmentação mínima e máxima do satélite (alvo) seja respeitada. As restrições (9) garantem que o tempo de transição para permitir o descarregamento de diferentes

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

satélites para uma mesma estação de solo seja respeitado, quando estes satélites possuem janelas de visibilidade para *download* próximas ou com sobreposição. Desta forma, o início do *download* do segundo satélite ocorrerá somente depois que a estação receber tudo que for definido receber do primeiro satélite e ela estiver pronta para receber os dados do segundo satélite, ou seja, após o tempo de transição ser respeitado. Lembrando que, como as janelas estão ordenadas no tempo, a janela *j* ocorre após a janela *r*. Da mesma forma, as restrições (10) foram incluídas para garantir que os dados poderão ser descarregados na segunda janela de visibilidade sobreposta, quando o descarregamento da primeira janela for finalizado.

No modelo (1)-(10) assume-se que $b_j > 0$. Desta forma, $DW_{ij} = 0$ significará que os dados do alvo *i* não serão descarregados.

4. Resultados

Para mostrar a aplicação do modelo proposto foram gerados alguns casos de testes, variando o número de alvos (imagens) e de janelas de visibilidade. A quantidade de alvos e de janelas está apresentada nas duas primeiras colunas das Tabela 1 e 2. A descrição de como os demais dados foram gerados está apresentado a seguir sendo que, para a instância com 30 imagens, estes dados foram gerados artificialmente para fim de testes do modelo.

O volume de dados das imagens foi considerado em torno de 4Gbytes e a taxa de transmissão em torno de 800 Mbits/s, de acordo com o valor da maioria dos satélites de observação da terra segundo [Eilertsen 2012]. A prioridade dos alvos foi atribuída aleatoriamente no intervalo de 1 e 3, sendo 3 os de maior prioridade. O tempo de transição para que uma estação alterne entre satélites distintos é específico e fixo para cada estação de solo, sendo computado entre as janelas de visibilidade. Para o problema foram consideradas durações entre 3 e 4 minutos, equivalente ao tempo de processamento de uma imagem média. A segmentação mínima e máxima das imagens é definida por satélite, estabelecendo as margens nas quais o modelo poderá segmentar as imagens no planejamento. Estes valores foram definidos entre 10 e 30 segundos para a segmentação mínima e, entre 300 e 500 segundos, para a segmentação máxima.

As janelas de visibilidade para *download* foram obtidas através do STK (do inglês, *Systems Tool Kit*), uma ferramenta de modelagem de sistemas espaciais [STK 2023]. Este tipo de ferramenta calcula, para determinados parâmetros dos satélites e das estações de solo, os diferentes períodos de tempo (janelas de visibilidade) que os alvos podem ser descarregados dentro do horizonte de planejamento (para mais detalhes sobre os conceitos e modelos que definem esta visibilidade, veja [Wertz 2009]). As janelas foram geradas considerando 4 satélites e 2 estações previamente modelados neste ambiente de simulação, para um horizonte de planejamento de 3 a 7 dias.

O modelo (1)-(10) foi implementado e resolvido utilizando o AMPL e o *solver* CPLEX [AMPL 2024]. Neste conjunto de testes, considerou-se que todos os alvos têm a mesma prioridade ($p_i = 1$) e que podem ser descarregados até o final do horizonte de planejamento. Os resultados obtidos estão apresentados nas duas últimas colunas da Tabela 1.

Tabela 1. Dados de entrada e solução para o modelo (1)-(10).

Alvos	Janelas de visibilidade	Função objetivo	Total de alvos descarregados
30	10	59	12
100	50	138	56
150	50	155	61
150*	50	261	138
200	50	167	64
200*	50	352	176

As instâncias com * na coluna “Alvos” da tabela correspondem à instância anterior, onde o tamanho das imagens foi reduzido, resultando em 20% do tempo de processamento em relação

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

ao descarregamento das imagens originais. Observe que esta alteração resulta numa quantidade maior de alvos descarregados, o que era esperado dado que o tamanho das imagens influencia no espaço ocupado em cada janela e quanto menor forem estes tamanhos, mais espaço estarão disponíveis para descarregar mais dados.

Para avaliar a influência que alguns parâmetros têm na solução do problema, foram feitos testes com um tempo de resposta mais apertado para alguns dos alvos, ou seja, com um *due time* menor. Para isto, foram gerados valores aleatórios dentro do horizonte de planejamento para o *due time* de alguns alvos para os mesmos casos de testes. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2, onde é possível observar uma redução considerável na quantidade de alvos descarregados, em alguns dos casos.

Tabela 2. Solução para prioridades distintas e *due time* mais apertado.

Alvos	**Janelas de visibilidade**	**Função objetivo**	**Total de alvos descarregados**
30	10	53	11
100	50	121	50
150	50	144	58
150*	50	159	70
200	50	161	63
200*	50	233	100

5. Considerações Finais

Este trabalho apresentou um novo modelo para o problema de planejamento para *download* de dados visando auxiliar na tomada de decisão em contextos espaciais, onde adaptações foram propostas para tratar novas restrições identificadas do problema. Uma nova estratégia para modelar o problema também foi proposta neste trabalho visando gerar uma formulação matemática mais compacta. Os resultados obtidos até o momento, segundo esta nova formulação, foram apresentados, incluindo testes com um tempo de resposta (*due time*) mais apertado, onde foi possível observar uma redução na quantidade de alvos descarregados.

O próximo passo do trabalho será a realização de testes computacionais variando outros parâmetros do problema para avaliar a influência no resultado final, como foi feito com o *due time*. Pretende-se também relaxar as restrições (2) do problema para avaliar quanto seria possível descarregar dos alvos, dentro do horizonte de planejamento. Este valor pode ser interessante para o decisor, pois mesmo não sendo possível descarregar os dados do alvo completamente, o restante destes dados poderia ser incluído no próximo planejamento, com uma prioridade mais alta de forma a aumentar a probabilidade de concluir o descarregamento total daqueles alvos.

Além disso, serão feitos novos testes utilizando outras instâncias, inclusive, com um horizonte de planejamento maior ou com uma quantidade maior de satélites ou de estações de solo, o que resultará numa quantidade maior de janelas de visibilidade. Testes serão então realizados para verificar a complexidade do modelo e a necessidade de desenvolver abordagens heurísticas para tratar o problema. Abordagens heurísticas também podem ser interessantes em situações em que um replanejamento seja necessário. Inclusive, está em andamento um trabalho de mestrado buscando propor metodologias heurísticas para tratar o problema [Pola *et al.* 2024].

Nossa expectativa é que a metodologia proposta, além de otimizar o planejamento para um sistema operacional existente, permita também identificar áreas de vulnerabilidade e apoiar planejamentos futuros referentes a aquisições de novas estações de solo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Projeto Temático FAPESP 2022/05803-3 e do Projeto PEmSE (Planejamento para Emprego de Sistemas Espaciais), em desenvolvimento no IEAv.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

Referências

AEB. Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE): 2012-2021. Brasília (2012). Disponível em: http://portal-antigo.aeb.gov.br/wp-content/uploads/2013/03/PNAE-Portugues.pdf. Acesso em: Abril de 2023.

AMPL: Streamlined modeling for real optimization. Disponível em: www.ampl.com. Acesso em: Junho de 2024.

Barbulescu, L. Howe, A. E., Watson, J. P. e Whitley, L. D (2002). Satellite range scheduling: A comparison of genetic, heuristic and local search. In *Proceedings of the International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, p. 611–620, Berlin, Germany.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas. Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE). Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2018. 36 p.

Castaing, J. (2014). Scheduling Downloads for Multi-Satellite, Multi-Ground Station Missions. In *28° Annual AIAA/USU. Conference on Small Satellites*.

CCSDS - Consultative Committee for Space Data Systems. Space Packet Protocol. CCSDS 133.0-B-2. June 2020. Disponível em: https://public.ccsds.org/Pubs/133x0b2e1.pdf. Acesso em: Jun 2024.

Chang, Z., Punnen, A. P., Zhou, Z., Cheng, S. (2023). Solving dynamic satellite image data downlink scheduling problem via an adaptive bi-objective optimization algorithm. *Computers & Operations Research*, 160, 106388, ISSN 0305-0548, https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106388

Eilertsen, B. (2012). Ground station networks vs. GEO relay satellites for polar orbiting satellites data download. Disponível em: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15871268. Acesso em: Junho de 2024.

Karapetyan, D., Mitrovic Minic, S., Malladi, K. T. e Punnen, A. P. (2015). Satellite downlink scheduling problem: A case study. *OMEGA - The International Journal of Management Science*, 53: 115–123.

Kim, H. e Chang, J. K. (2015). Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time. *Aerospace Science and Technology*, 40: 17-32.

Marinelli, F., Nocella, S., Rossi, F., Smriglio, S. (2011). A Lagrangian heuristic for satellite range scheduling with resource constraint. *Computers & Operations Research*, 38, 1572-1583.

Pinto, M. J., Barros, A. I., Noomen, R., van Gelder, P. H. A. J. M. e Lamballais Tessensohn, T. (2018). A New Model Proposal for Integrated Satellite Constellation Scheduling within a Planning Horizon given Operational Constraints. In *Proceedings of the 7th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems: ICORES*, p. 312-319. ISBN 978-989-758-285-1. DOI: 10.5220/0006655003120319.

Pinto, M. J., De Marchi, M. M. e Iwazaki, A. C. (2020). Planejamento para Emprego de Sistemas Espaciais (PEmSE): Modelo Matemático e Adaptações. In *Anais do XXII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa* (*SIGE*), p. 170-175, São José dos Campos, SP. ISSN: 1983 7402.

Pinto, M. J., Pola, H., Belderrain, M. C. N., Hayashi, A. C. I., Shiguemori, E. H., Kuck, T. N. e De Marchi, M. M. (2023) Modelo matemático para otimização do planejamento para *download* de dados considerando múltiplos satélites e múltiplas estações de solo. In *Anais do LV SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, São José dos Campos, SP.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393

Pola, H., Pinto, M. J. e Belderrain, M. C. N. (2024) Otimização do Planejamento para o *Download* de Imagens obtidas por Satélites de Observação da Terra às Estações de Solo. In *XXV ONPCE - Oficina Nacional de Problemas de Corte e Empacotamento, Planejamento e Programação da Produção e Correlatos*, Bauru, SP.

Song, B., Yao, F., Chen, Y., Chen, Y. e Chen, Y. (2018). A Hybrid Genetic Algorithm for Satellite Image Downlink Scheduling Problem. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018, 1-11. doi:10.1155/2018/1531452

Spangelo, S., Cutler, J., Gilson, K. e Cohn, A. (2015). Optimization-based scheduling for the single-satellite, multi-ground station communication problem. *Computers & Operations Research*, 57: 1–16. doi:10.1016/j.cor.2014.11.004

STK - Systems Tool Kit: AGI Products. Disponível em: https://agi.com/products/stk. Acesso em: Junho de 2024.

Wertz, J. R. (2009). Orbit & Constellation, Design & Management. Space Technology Library. Microcosm/Kluwer. 968 páginas.

Xhafa, F., Barolli, A., & Takizawa, M. (2013). Steady State Genetic Algorithm for Ground Station Scheduling Problem. In *2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications* (*AINA*). doi:10.1109/aina.2013.147

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193393
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/193393