

## **OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO PARA *DOWNLOAD* DE DADOS PARA MÚLTIPLOS SATÉLITES E MÚLTIPLAS ESTAÇÕES DE SOLO UTILIZANDO GRASP**

**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 trata o planejamento para *download* de dados obtidos por múltiplos satélites para múltiplas estações de solo, em um horizonte de planejamento predefinido. O problema foi resolvido utilizando o método GRASP buscando maximizar a quantidade de dados descarregados, atender a prioridade destes dados e garantir que o *download* ocorra dentro das janelas de visibilidade e no tempo de resposta desejado. Neste trabalho, considera-se que o *download* para uma estação de solo pode ser realizado por diferentes satélites ou o mesmo satélite pode descarregar para diferentes estações de solo desde que um tempo de transição seja respeitado quando as respectivas janelas de visibilidade se sobrepoem ou estejam próximas. Além disso, o *download* dos dados armazenados nos satélites pode ser feito em pacotes com tamanhos variáveis a serem definidos pela otimização. O GRASP foi aplicado em algumas instâncias e comparado com o método proposto anteriormente.

**PALAVRAS CHAVE.** Planejamento para *Download* de Dados, GRASP, 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 addresses the data download scheduling problem obtained by multiple satellites to multiple ground stations, in a predefined planning horizon. The problem was solved using the GRASP methodology aiming to maximize the number of downloaded data, to attend the priority of those data and to ensure that the download would take place within the available visibility time-windows and the due time. This approach also considers that the download to a ground station can be performed by different satellites, or the same satellite can download to different ground stations, as long as a setup time is respected if the respective visibility time-windows overlap or are close. Furthermore, this work assumes that the download of the data stored on satellites can be done in packets with variable sizes to be defined by the optimization. GRASP was applied in some instances and was compared to the previous proposed methodology.

**KEYWORDS.** Data Download Scheduling Problem. GRASP. Multiple Satellites and Multiple Ground Stations.

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

## 1. Introdução

Com o aumento do uso de tecnologias espaciais e, consequentemente, do consumo de bens e serviços fornecidos por sistemas espaciais, torna-se altamente relevante o desenvolvimento de pesquisas que busquem otimizar o emprego destes sistemas. No Brasil, as atividades espaciais são norteadas pelo Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), responsável por transferir as necessidades definidas pela Agência Espacial Brasileira (AEB) a um plano que orienta todas as entidades ligadas ao setor. O objetivo, neste caso, é que as organizações trabalhem de forma sinérgica em prol do desenvolvimento adequado à realidade e às necessidades do país [Brasil 2021].

Em relação à Defesa, a área espacial é regida pelo Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), responsável pela estruturação da implantação dos sistemas espaciais sob a ótica da defesa nacional. Neste programa estão estabelecidas demandas para sustentação logística, desenvolvimento de satélites e respectivos sistemas de solo [BRASIL 2018].

Este trabalho busca contribuir com as pesquisas em desenvolvimento no contexto espacial visando apoiar o processo de tomada de decisão no que se refere ao planejamento para *download* de imagens de diferentes alvos (áreas de interesse), obtidos por múltiplos satélites utilizando múltiplas estações de solo e buscando otimizar o descarregamento destas imagens, em um dado horizonte de planejamento. Busca ainda atender os requisitos do problema como, por exemplo, a prioridade dos alvos, que o *download* ocorra dentro das janelas de visibilidade disponíveis (oportunidades de contato entre os satélites e as estações de solo) e que o *due time* (o último momento possível, dentro do horizonte de planejamento, para que as imagens coletadas estejam disponíveis na estação de solo) seja atendido da melhor forma possível. Este trabalho também considera que o *download* para uma estação de solo pode ser realizado por diferentes satélites ou o mesmo satélite pode descarregar para diferentes estações de solo, mesmo que as respectivas janelas de visibilidade se sobreponham ou estejam próximas, desde que um tempo de transição seja respeitado. Além disso, considera-se que o *download* dos dados armazenados nos satélites pode ser feito em pacotes com tamanhos variáveis a serem definidos pela otimização.

Em [Pola *et al.* 2024], o problema foi tratado utilizando a metaheurística *Simulated Annealing* (SA) como método principal de busca, partindo de uma solução GRASP (do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) como solução inicial, neste caso, correspondente à uma execução deste método. Este trabalho irá analisar a possibilidade de utilizar o GRASP não somente para gerar a solução inicial, mas também como método principal de busca para resolver o problema.

A próxima seção apresenta uma breve revisão da literatura e, na Seção 3, o método GRASP, como proposto por [Feo e Resende 1989], é apresentado. A definição do problema e as premissas consideradas são apresentadas na Seção 4 e a metodologia proposta, utilizando o método GRASP para resolver o problema, é detalhada na Seção 5. A Seção 6 apresenta os testes computacionais realizados e os resultados obtidos ao aplicar o GRASP em algumas instâncias, juntamente com a comparação com o método utilizado anteriormente para tratar o problema. Na Seção 7, algumas considerações finais e propostas de trabalhos futuros são apresentadas.

## 2. Revisão da Literatura

A literatura tem apresentado um aumento de estudos referentes ao planejamento de tarefas em dispositivos espaciais, em particular, relacionados ao planejamento para o *download* de dados, tema deste trabalho. Entretanto, são apresentadas diferentes abordagens para tratar o problema.

A primeira abordagem busca otimizar a quantidade de dados transmitidos ao longo das janelas de visibilidade, mas não controla quais dados e, referentes a quais imagens, estão sendo efetivamente descarregados. São considerados os conflitos entre janelas e períodos de menor probabilidade de sucesso de transmissão. Essa abordagem pode ser observada em trabalhos como [Castaing 2014] e [Spangelo *et al.* 2015]. Em [Castaing 2014] são consideradas também restrições referentes à energia necessária para execução das tarefas, assim como em [Spangelo *et al.* 2015],

porém, restrito a um satélite. Em ambos os trabalhos, a resolução do problema utiliza técnicas de *branch-and-bound* frente a cenários reais de operação.

Na segunda abordagem, as imagens passam a ser tratadas de forma individualizada, buscando maximizar a quantidade de imagens descarregadas integralmente, sem possibilidade ainda de segmentação. Neste contexto, o trabalho de [Karapetyan *et al.* 2015] considera prioridades distintas de descarregamento entre imagens previamente adquiridas e que deverão ser descarregadas para múltiplas estações. Esse trabalho considera um cenário de satélite único, cujo objetivo é minimizar o atraso de execução de todos os *downloads* em um horizonte de planejamento de 24h. Song *et al.* [2018] apresentam um trabalho semelhante onde o objetivo, por sua vez, é maximizar o somatório de prioridades das imagens efetivamente agregadas ao planejamento. Nesse trabalho, não são permitidos atrasos na entrega das imagens e considera-se um custo de operação diferente entre as estações. Para tratar estes custos distintos, os autores incluem uma penalização na função objetivo, de forma a reduzir o uso das estações mais custosas no planejamento. Em ambos os trabalhos são aplicadas heurísticas construtivas gulosas associadas a variações de GAs (Algoritmos Genéticos), para refinamento das soluções.

Na terceira abordagem, a revisão de literatura revela a preocupação com a eficiência do armazenamento e descarregamento de dados das imagens, em concordância aos protocolos CCSDS [CCSDS 2020], permitindo a alocação de pacotes de dados, ao longo das janelas de visibilidade. Um dos primeiros trabalhos a tratar o problema desta forma foi [Marinelli *et al.* 2011], onde uma heurística baseada em relaxação lagrangeana foi desenvolvida para maximizar a alocação dos pacotes de dados, com prioridades distintas, ao longo das janelas de visibilidade. Mais recentemente, [Chang *et al.* 2023] consideraram a segmentação e empacotamento dos dados em uma abordagem biobjetiva, onde buscaram maximizar o sucesso de descarregamento das imagens completas maximizando o equilíbrio da utilização das janelas disponíveis. Esses autores desenvolveram um algoritmo adaptativo de otimização biobjetiva (NSGA2ALNS), combinando a busca adaptativa por grandes vizinhanças (ALNS) com o algoritmo genético de ordenação não dominada, NSGA-II.

Um modelo matemático foi proposto em [Pinto *et al.* 2023] 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. O modelo também garante 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 seja respeitado o tempo de transição para que a estação alterne o recebimento de dados entre os diferentes satélites. Uma nova estratégia para modelar o problema foi proposta em [Pinto *et al.* 2024], para obter uma formulação mais compacta em relação à proposta anteriormente e, para considerar a segmentação variável dos pacotes, ou seja, o total de dados descarregados em uma determinada janela de visibilidade passou a ser uma variável de decisão a ser definida pelo modelo. Além disso, novas adaptações foram incluídas em relação ao descarregamento dos dados armazenados nos satélites e para garantir a transição entre um satélite e outro, em casos onde existam janelas de visibilidade sobrepostas, quando um mesmo satélite pode descarregar para diferentes estações de solo. Em [Pola *et al.* 2024], este problema foi resolvido utilizando a meta-heurística *Simulated Annealing*, a qual será utilizada, neste trabalho, para comparação de resultados com o método GRASP proposto.

Os trabalhos de [Marinelli *et al.* 2011] e [Pinto *et al.* 2023] consideram a fragmentação em pacotes de dados no descarregamento das imagens armazenadas nos satélites mas, nestes trabalhos, o tamanho dos pacotes são pré-definidos e não variáveis, como define o protocolo emitido pelo CCSDS [CCSDS 2020]. Em [Chang *et al.* 2023], [Pinto *et al.* 2024], [Pola *et al.* 2024] e, no presente trabalho, esta variação é considerada onde, inclusive, em [Chang *et al.* 2023] 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*.

### 3. GRASP

O método GRASP foi proposto por Feo e Resende (1989) e baseia-se na ideia de gerar soluções semi-gulosas de maneira construtiva ao longo das iterações do algoritmo. Esta metodologia foi projetada, a princípio, para ser composta por duas fases principais: a construção de uma solução inicial e uma busca local. Dessa forma, garante-se uma boa solução inicial para que uma busca local especializada explore as melhorias. Essa construção semi-gulosa permite diversidade ao processo, o que pode ser interessante para determinados tipos de problemas. Além disso, sua aplicação é associada a abordagens com múltiplas execuções – sob um conceito de “multi-start” – guardando a melhor obtida em todas as execuções.

O GRASP é conhecido por ser uma técnica eficiente para encontrar boas soluções em um tempo relativamente reduzido, devido à sua rotina simples. Seu conceito é combinar a aleatoriedade e estratégias gulosas para explorar o espaço de soluções parciais, através de uma lista de soluções candidatas, a RCL (do inglês, *Restricted Candidate List*). A RCL é a lista que restringe as vizinhanças viáveis que podem ser exploradas na iteração corrente a um conjunto  $\mathcal{F}$ , elencadas sob algum critério guloso e dimensionada por um parâmetro  $\alpha$ , responsável por definir o tamanho da vizinhança considerada e, consequentemente, o quão guloso será o processo. Em sua concepção, a definição da RCL respeita duas formas gerais:

- Por cardinalidade: um número limitado de  $k$  soluções parciais viáveis pertencentes à  $\mathcal{F}$  é alocado à RCL;
- Por qualidade: a RCL é constituída segundo um subconjunto de  $\mathcal{F}$ , controlado por um parâmetro  $\alpha$ , que definirá um ponto de corte  $c_i$ ,  $i \in \mathcal{F}$ , para a lista, sob o ponto de vista da qualidade dos vizinhos. Para um problema de minimização, o ponto de corte será definido da seguinte maneira:

$$c_{\min} \leq c_i \leq c_{\min} + \alpha(c_{\max} - c_{\min})$$

onde:  $c_{\min} = \min \{c_i: i \in \mathcal{F}\}$ ,  $c_{\max} = \max \{c_i: i \in \mathcal{F}\}$  e  $0 \leq \alpha \leq 1$

Desta forma:

$\alpha = 0$  corresponderá a um algoritmo puramente guloso, pois sempre será selecionado o elemento de custo mínimo de  $\mathcal{F}$ ;

$\alpha = 1$  corresponderá a um algoritmo totalmente aleatório, sendo que qualquer elemento de  $\mathcal{F}$  poderá ser selecionado.

O processo de construção ocorre de maneira iterativa até que um critério de parada seja atingido. Após construída a solução inicial, uma busca local pode ser associada para melhorias pontuais às soluções que, potencialmente, já terão boa qualidade.

O GRASP é um processo iterativo que repete as fases de construção e busca local por um número grande de vezes, cada vez com uma nova solução inicial. Ao final de todas as iterações, a melhor solução encontrada pode ser considerada como a solução final. Nesse caso, a convergência do GRASP para obter boas soluções será baseada na diversidade das soluções iniciais e na eficácia da busca local em explorar diferentes regiões do espaço de soluções [Feo e Resende 1989].

### 4. Definição do problema

Dado um conjunto  $I$  de imagens, obtidas por diferentes satélites que serão descarregadas para um conjunto de estações de solo e um conjunto  $J$  de janelas de visibilidade, disponíveis ao longo do horizonte de planejamento, o objetivo do problema consiste em maximizar a quantidade de imagens alocadas por completo durante as janelas de visibilidade, buscando atender as respectivas prioridades e permitindo a segmentação das imagens. A avaliação de cada solução do problema (planejamento gerado) é feita ao contabilizar o somatório de prioridades agregadas àquela solução. Além disso, considera-se as seguintes premissas:

- a) Uma imagem é totalmente descarregada durante o horizonte de planejamento ou não estará presente no planejamento, ou seja, alocações parciais não são permitidas;

- b) Cada imagem poderá ser alocada apenas uma vez no planejamento, não permitindo múltiplas alocações da mesma imagem;
- c) Estações de solo e satélites possuem exclusividade no serviço, ou seja, são capazes de receber/transmitir dados com um dispositivo por vez;
- d) Para cada satélite, existe um limite inferior e superior conhecido para a segmentação das imagens de um mesmo satélite ao longo das janelas, que devem ser respeitados para o particionamento dos dados originais;
- e) Os segmentos alocados em uma mesma janela não podem exceder a duração daquela janela;
- f) Um tempo de transição é preciso ser considerado, para que uma estação esteja pronta para receber dados de diferentes satélites, em particular, quando existem sobreposições entre janelas de uma mesma estação e satélites distintos. Neste trabalho, assume-se um valor fixo para este tempo de transição para cada estação, independente do satélite que estiver fazendo o *download*. Estas sobreposições serão denominadas sobreposições do Tipo 1;
- g) Durante uma passagem, os satélites poderão descarregar seus dados para estações distintas mesmo que as respectivas janelas estejam sobrepostas ou próximas. Mas, diferentemente da premissa anterior, não será adicionado um tempo de transição para que os satélites alterem entre as estações, por não ser considerado um tempo significativo. Estas sobreposições serão denominadas de sobreposições do Tipo 2;
- h) As sobreposições do Tipo 1 e do Tipo 2 serão tratadas para todo par de janelas, ou seja, para casos em que existam janelas próximas ou sobrepostas, elas serão tratadas duas a duas;
- i) Para cada imagem  $i$ ,  $i \in I$ , é atribuído um *due time*  $DT_i$  e um valor de prioridade  $P_i$  representando o valor ponderado que o descarregamento completo de uma determinada imagem irá agregar no planejamento. Neste trabalho, inspirado no trabalho de Chen *et al.* (2020), considera-se que o *due time* poderá ser extrapolado, mas que este atraso resultará em uma redução do valor do descarregamento da imagem  $i$ , o valor de  $P_i$ . Para isto,  $P_i$  será penalizado segundo uma função exponencial decrescente, a partir do seu valor original, se aproximando de zero ao término do horizonte de planejamento. Sendo assim, o valor que, efetivamente, será contabilizado será um  $P_i$  ajustado, denominado  $P'_i$ , conforme (1).

$$P'_i = \begin{cases} P_i & \text{se } E'_i \leq DT_i, \forall i \in I \\ P_i \cdot e^{-\lambda(E'_i - DT_i)} & \text{se } E'_i > DT_i, \forall i \in I \end{cases} \quad (1)$$

onde:  $E'_i$  indica, para cada iteração/solução gerada pelo método, o instante final da última janela utilizada para descarregar a imagem  $i$  e  $\lambda$  é o parâmetro da função exponencial que irá estabelecer o padrão da penalização pelo atraso. Sendo assim, se  $E'_i$  exceder  $DT_i$ , a prioridade será ajustada para refletir a penalização.

Para representar uma solução do problema, optou-se por utilizar matrizes, onde o número de linhas corresponde ao número de imagens a serem alocadas e, o número de colunas, ao número de janelas de visibilidade distribuídas no horizonte de planejamento. Adicionou-se, ainda, uma coluna auxiliar nesta matriz que receberá valor 1, se a imagem foi alocada no planejamento e valor 0, caso contrário. Esta representação foi baseada no trabalho de Chang *et al.* (2023).

A Figura 1 ilustra a representação de uma possível matriz solução, para um exemplo com 5 janelas e 10 imagens.

Atribuição de “0” ou “1” na coluna auxiliar

| Imagem | Planejamento | Janela 1 | Janela 2 | Janela 3 | Janela 4 | Janela 5 |
|--------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1      | 1            | 0,3      | 0        | 0,7      | 0        | 0        |
| 2      | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 3      | 1            | 0,2      | 0        | 0        | 0,1      | 0,7      |
| 4      | 1            | 0        | 0,8      | 0        | 0,1      | 0,1      |
| 5      | 1            | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 6      | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 7      | 1            | 0,3      | 0        | 0,7      | 0        | 0        |
| 8      | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 9      | 1            | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        |
| 10     | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |

Atribuição dos segmentos das imagens “Alocáveis” = 1

Figura 1 – Estrutura matricial de representação da solução.

Desta forma, os valores alocados em cada célula da matriz solução, a partir da segunda coluna, representam os segmentos da imagem  $i, i \in I$ , presentes na janela de visibilidade  $j, j \in J$  e, conseqüentemente, na solução, que irão corresponder ao tempo (em segundos) que cada imagem utilizou do tempo total de cada janela de visibilidade para ser descarregada.

## 5. Metodologia de resolução

A partir da representação da solução apresentada na Seção 4, a metodologia de otimização proposta é composta por duas fases:

**Fase I** - Para lidar com as sobreposições das janelas de visibilidade, um método exato é aplicado como um pré-processamento, onde o objetivo é redimensionar estas janelas de forma otimizada, suprimindo as sobreposições e buscando maximizar a duração de cada janela. Sendo assim, para cada janela de visibilidade  $j, j \in J$ , utiliza-se o modelo matemático (2)-(9), o qual busca maximizar o tamanho final das janelas ( $x_j$ ) levando em consideração as sobreposições. Para isso, a duração das janelas é ponderada pelos fatores  $T_j$  e  $P_j^{sum}$  que correspondem, respectivamente, à taxa de transferência e ao somatório das prioridades a bordo de cada satélite que pode descarregar seus dados naquela respectiva janela.

$$\max \sum_{j \in J} (T_j \times P_j^{sum}) x_j \quad (2)$$

sujeito a:

$$x_j = end'_j - start'_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$start'_k \geq end'_j + setup_g, \quad j, k \in J, g \in G, start_j < start_k / G_j = G_k \quad (4)$$

$$start'_k \geq end'_j, \quad j, k \in J, \quad start_j < start_k / S_j = S_k \quad (5)$$

$$start'_j \geq start_j \quad j \in J \quad (6)$$

$$end'_j \leq end_j \quad j \in J \quad (7)$$

$$start'_j \leq end'_j \quad j \in J \quad (8)$$

$$start'_j, end'_j \in \mathbb{R}_+ \quad j \in J \quad (9)$$

onde:

- $start_j$  e  $end_j$  representam, respectivamente, o momento inicial e final das janelas de visibilidade iniciais;
- $start'_j$  e  $end'_j$  representam, respectivamente, o momento inicial e final das janelas de visibilidade, após o pré-processamento.

A função objetivo (2) maximiza o uso ponderado das janelas de visibilidade, levando em consideração  $T_j$  e  $P_j^{sum}$ . As restrições (3) definem a nova duração de cada janela no horizonte de planejamento. As restrições (4) tratam as sobreposições do Tipo 1 onde, para qualquer par de janelas  $k$  e  $j$ , sendo que  $k$  ocorre após  $j$  e pertencentes à mesma estação  $G$  ( $G_j = G_k$ ), seja contabilizado o tempo de transição da respectiva estação ( $setup_g$ ) e seja garantido que o instante inicial de  $k$  ocorra após o instante final de  $j$ . De maneira análoga, as restrições (5) tratam as sobreposições do Tipo 2 ao garantir que, para todo par de janelas distintas pertencentes a um mesmo satélite  $S$  ( $S_j = S_k$ ), onde  $k$  ocorre após  $j$ , a sobreposição original seja removida garantindo que o instante inicial de  $k$  ocorra após o instante final de  $j$ . As restrições (6) e (7) garantem que o início e o término da janela  $j$  após o pré-processamento estará limitado pelos instantes iniciais e finais originais dessa janela e, as restrições (8), que o novo início de cada janela ocorra antes do término desta janela. Por fim, as equações (9) definem o domínio das variáveis de decisão, caracterizando um modelo de programação linear.

Desta forma, o modelo matemático (2)-(9) redimensiona as janelas buscando alocar o período sobreposto entre as janelas de forma a priorizar os satélites que possuem mais imagens prioritárias a bordo e com maior capacidade de transmissão, buscando respeitar as restrições de transição entre satélites e a não sobreposição de janelas para um mesmo satélite ou estação.

Para ilustrar a lógica e os resultados da fase de pré-processamento, a Figura 2 apresenta o resultado (seta cinza) para ambos os tipos de sobreposição.

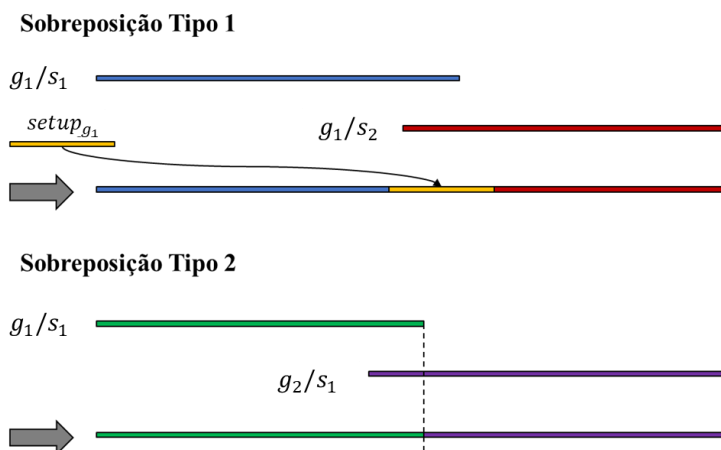


Figura 2 – Imagem ilustrativa do resultado da fase de pré-processamento.

**Fase II** - Com o redimensionamento das janelas após a Fase I, a solução inicial é gerada por meio de um processo construtivo baseado no método GRASP (para mais detalhes sobre o algoritmo original GRASP, veja a Seção 3). Para essa construção, ajusta-se o quão guloso será o algoritmo por meio do fator  $\alpha$ , ao definir o tamanho da lista de imagens candidatas a cada iteração. Neste trabalho, elenca-se as imagens por maior  $P$  e é feito um desempate pelo menor valor de  $DT$ , iniciando-se por uma das imagens contidas na lista, associando às primeiras janelas disponíveis para a imagem e permitindo sua segmentação, caso necessário. Esse processo itera sobre todas as imagens, até que não seja possível alocar mais nenhuma no planejamento, gerando assim uma solução viável para o problema do *download*. Este método é executado por um número  $n$  predeterminado de vezes de forma cíclica sob o mesmo parâmetro de controle  $\alpha$ , sendo a melhor solução apresentada como resultado final. A abordagem proposta é utilizar os conceitos do GRASP para obtenção de soluções de boa qualidade, de maneira rápida, ao utilizá-lo de forma iterativa por um número de vezes.

Em síntese, a metodologia baseia-se na aplicação inicial de um algoritmo de solução exata que efetue um pré-processamento das janelas de visibilidade ao suprimir sobreposições e

contabilize o tempo de *setup* das estações de solo. A partir disso, o método GRASP será executado  $n$  vezes, retornando a melhor solução encontrada ao final das execuções.

## 6. Resultados

Os testes computacionais e análises realizadas foram iniciados utilizando a instância de teste apresentada em [Pola *et al.* 2024] que contém 30 imagens, 4 satélites e 2 estações, resultando em 10 janelas de visibilidade. Para esta instância, os dados de entrada foram gerados artificialmente. Uma taxa de transferência entre 300 e 600 Mbits/s é atribuída à cada satélite, que contém um volume de dados das imagens em *bits* variando entre 3 e 5 GB. A cada imagem foi atribuída uma prioridade  $P$  entre 1 e 10 e *due-time* (DT) distintos limitados ao horizonte de planejamento. Esses valores foram gerados aleatoriamente, segundo uma distribuição normal. Os valores de  $setup_g$  foram considerados com duração de 4 minutos, aproximadamente, equivalente ao tempo de descarregamento de uma imagem média, impactando assim, diretamente na alocação das imagens. Os parâmetros de segmentação mínima e máxima das imagens ficaram, respectivamente, entre 10 e 30 segundos e, entre 300 e 600 segundos. A metodologia de otimização proposta foi implementada em *Python* em sua versão 3.11.

A Figura 3 mostra os resultados variando o parâmetro  $\alpha$  para esta instância de teste, onde o eixo  $x$  representa a execução e o eixo  $y$  o valor de *sum Pr*, que corresponde ao somatório das prioridades ajustadas das imagens presentes no planejamento. Para cada valor de  $\alpha$ , a Figura 3 ilustra as diferentes soluções geradas até atingir o critério de parada que, para este exemplo ilustrativo, foi o total de execuções do método, no caso, de 20 execuções.

Para efeito de comparação, o valor de *sum Pr*, para o valor de  $\alpha = 0$ , ou seja, para o caso determinístico, resultou em 50.932, com 12 imagens descarregadas e um atraso médio de 4h30m. E, a melhor solução encontrada para cada um dos casos da Figura 3 foram: 58.893, 12 imagens descarregadas e atraso médio de 3h30 min ( $\alpha = 0,2$ ); 57.436, 12 imagens descarregadas e atraso médio de 2h48m ( $\alpha = 0,5$ ); e, 47.673, 10 imagens descarregadas e atraso médio de 4h25m ( $\alpha = 0,7$ ), mostrando a influência do parâmetro de controle no resultado final. Em relação ao *Simulated Annealing*, o resultado obtido para esta instância de teste foi de 51.037, com 13 imagens descarregadas e atraso médio de 05h30m. Com isto, observa-se que a soma das prioridades das imagens descarregadas fica associada não só à quantidade de imagens e ao atraso, mas também a quais imagens foram selecionadas para o planejamento.

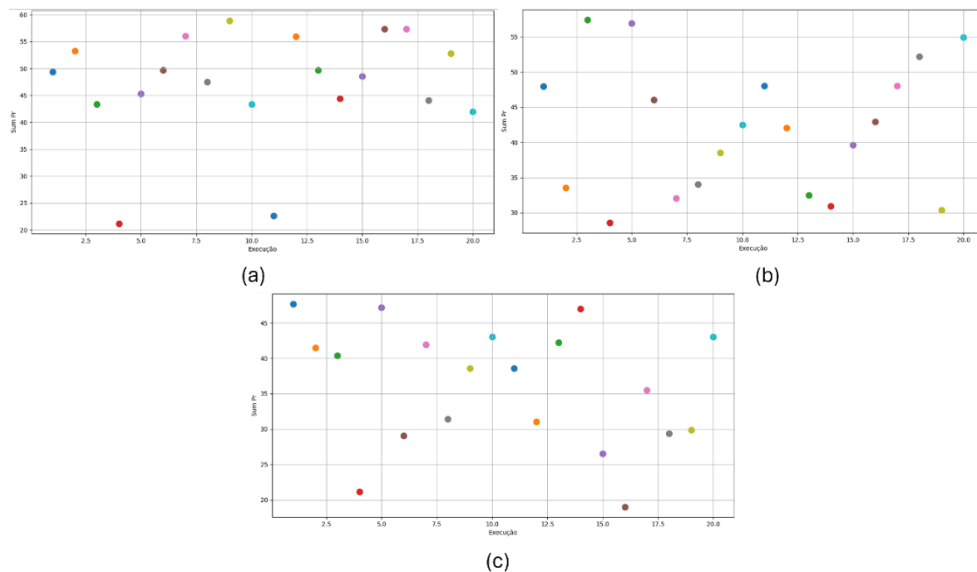


Figura 3. Resultados GRASP para: (a)  $\alpha = 0,2$  (b)  $\alpha = 0,5$  (c)  $\alpha = 0,7$ .

Na sequência, foram realizados novos testes computacionais, para comparar os resultados do método GRASP com o *Simulated Annealing*. Para estes testes, os parâmetros de controle de cada metodologia de resolução foram calibrados usando o IRACE [López-Ibáñez *et al.* 2016], resultando em:

- GRASP:  $\alpha = 0,35$
- SA:  $T_{inicial} = 130$ ;  $T_{resf} = 0,99$ ;  $T_{final} = 0,35$

onde:  $T_{inicial}$ ,  $T_{resf}$ ;  $T_{final}$  representam, respectivamente, a temperatura inicial, a taxa de resfriamento e a temperatura final do *Simulated Annealing*.

Para os dados de entrada para estes testes, optou-se por utilizar satélites da constelação ICEYE [ICEYE 2024], pois é a constelação contratada pelo Ministério da Defesa para obter imagens de sensoriamento remoto radar para diversas aplicações no contexto nacional. Sob essa condição, todos os satélites da constelação residem em órbita baixa e geram oportunidades de passes sobre o território nacional com uma frequência média de 8 vezes a cada 24h. A cada satélite foram atribuídas imagens com volume médio de dados de 4Gbytes. Cada satélite possui uma quantidade de imagens geradas aleatoriamente e proporcional ao horizonte de planejamento, considerando um valor médio de aquisição de 14 a 20 imagens adquiridas por dia por cada satélite. Esse valor foi estipulado desta forma, pois considerou-se suficiente para verificação do desempenho de cada método, ao fornecer uma quantidade de imagens que dificulte a alocação.

No primeiro teste, os dados das janelas foram gerados a partir de um horizonte de planejamento reduzido de 12h para 6 satélites da constelação ICEYE e de 2 estações de solo localizadas em solo brasileiro, perfazendo 20 janelas no total. As imagens foram geradas artificialmente, num total de 60 imagens, todas previamente adquiridas no instante zero do horizonte de planejamento. A cada imagem atribuiu-se um  $DT$  aleatoriamente entre 30 min até o instante final do horizonte de planejamento. A Figura 4 apresenta o gráfico de convergência do *Simulated Annealing* em comparação com o melhor resultado do GRASP.

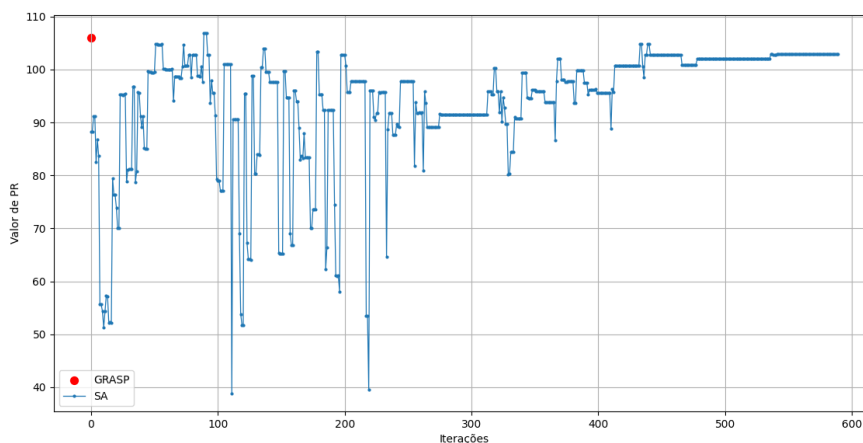


Figura 4 – Gráfico de convergência comparativo entre o GRASP e o *Simulated Annealing*.

A Figura 4 sugere que, para a instância considerada, o SA explora com certa efetividade o espaço de soluções à medida que seu processo é conduzido, mas não obtém soluções melhores do que a melhor solução obtida pelo GRASP. Nota-se, ainda, que logo nas iterações iniciais (próximo da centésima) o SA já obtém o seu melhor *score*, atingindo valores semelhantes nas iterações subsequentes, mesmo com temperaturas inferiores, o que favoreceria uma busca mais localizada.

Novos testes foram realizados variando agora o número de imagens, de estações de solo e de satélites e, conseqüentemente, de janelas de visibilidade, considerando agora um horizonte de planejamento de 1 dia. Neste caso, 3 novos cenários foram considerados para a geração das instâncias, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Dados das novas instâncias.

| Instância | Nº de imagens | Nº de Janelas | Nº de Estações | Nº de Satélites |
|-----------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| I-1       | 80            | 32            | 2              | 4               |
| I-2       | 90            | 42            | 2              | 6               |
| I-3       | 90            | 85            | 4              | 6               |

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos, onde a coluna “Melhor Solução” representa a melhor solução encontrada pelo respectivo método; a coluna “Nº de Imagens” representa quantas imagens foram alocadas na melhor solução; a coluna “Atraso Médio” corresponde ao somatório dos atrasos considerando todas as imagens (em horas); a coluna “Média das Soluções” representa a média das soluções de cada método; a coluna “Desvio Padrão”, apresenta o desvio padrão para esses valores; a coluna “Nº de Execuções” indica quantas vezes o respectivo método foi executado, dentro do tempo limite de 200 segundos.

Tabela 2 – Resultados das metodologias para as novas instâncias.

| Instância | Método | Melhor solução | Nº de Imagens | Atraso médio | Média das soluções | Desvio Padrão | Nº de Execuções |
|-----------|--------|----------------|---------------|--------------|--------------------|---------------|-----------------|
| I-1       | GRASP  | 199,516921     | 44            | 0,53         | 186,25             | 5,17          | 690             |
|           | SA     | 201,875264     | 43            | 0,11         | 186,91             | 19,29         | 3               |
| I-2       | GRASP  | 287,327619     | 58            | 0,2          | 280,29             | 3,81          | 548             |
|           | SA     | 284,027926     | 58            | 0,09         | 281,47             | 2,11          | 3               |
| I-3       | GRASP  | 323,828332     | 61            | 0,23         | 312,56             | 6,38          | 530             |
|           | SA     | 321,444834     | 62            | 0,2          | 320,01             | 1,14          | 3               |

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que o SA e o GRASP são equivalentes em termos da melhor solução e do número de imagens descarregadas. No entanto, devido ao mecanismo mais sofisticado de exploração do espaço de soluções, o SA tende a obter soluções com menor atraso médio, principalmente, devido ao fato que este método utiliza estruturas de vizinhanças que permitem que o atraso das imagens seja reduzido gradativamente, à medida que a exploração se torna mais localizada. Por outro lado, os resultados explicitam que o GRASP é computacionalmente menos custoso para a resolução das instâncias, dado que o SA é executado apenas 3 vezes para cada rodada de testes, enquanto o GRASP é capaz de gerar centenas de soluções viáveis para o problema. Do ponto de vista prático, esse comportamento favorece o uso do método e pode ser determinante para resolução de instâncias maiores cujo tempo computacional poderá ser elevado para obtenção das soluções.

Para ilustrar esse comparativo entre os dois métodos, a Figura 5 apresenta o gráfico de convergência do *Simulated Annealing* em comparação com o melhor resultado do GRASP para a instância I-3.

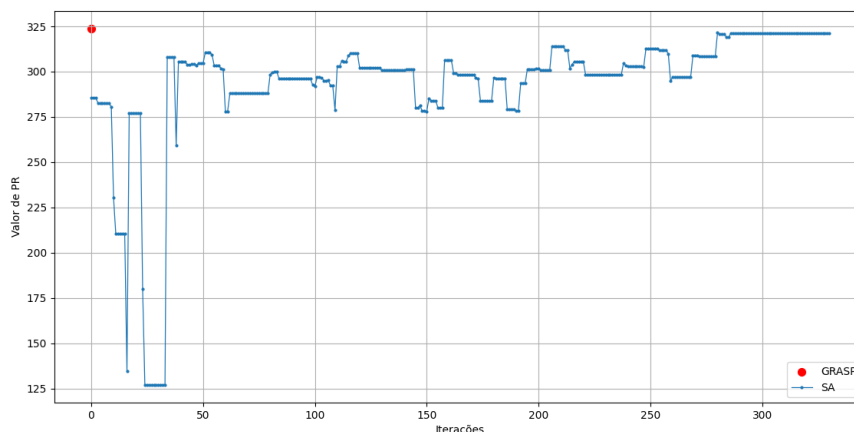


Figura 5 – Gráfico de convergência comparativo entre as metodologias para I-3.

Na Figura 5 é possível observar que, mesmo possuindo uma capacidade potencial de explorar o espaço de soluções de maneira eficiente, o SA não consegue superar o GRASP, cujo mecanismo guloso potencialmente garante a seleção das imagens mais prioritárias, por apresentar a melhor solução. Por outro lado, como comentado anteriormente, os resultados da Tabela 2 indicam que o SA foi capaz de oferecer soluções com menor atraso.

## 7. Considerações Finais

Este trabalho apresentou a aplicação do GRASP para resolução do problema de planejamento para *download* de dados visando auxiliar na tomada de decisão em contextos espaciais. Os resultados obtidos foram apresentados e o GRASP mostrou capacidade de oferecer boas soluções em virtude do critério guloso de seleção das imagens. Em comparação com o *Simulated Annealing*, foi possível observar uma melhoria da solução para algumas das instâncias ou equivalência quando se permite a geração de várias soluções através do GRASP com o intuito de selecionar a melhor obtida. Nota-se também que o GRASP oferece boas soluções em tempo computacional bem inferior devido à sua simplicidade, o que permitiu esta abordagem *multi-start*.

O próximo passo do trabalho será a realização de novos testes computacionais 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. A variação na quantidade e no tamanho das imagens pode ser também outra variação a ser considerada, para avaliar a influência no resultado final.

Além disso, em relação ao GRASP, pode ser interessante testar novas variações do fator que define o quão guloso o método será. Os novos testes computacionais terão como objetivo verificar a capacidade do método de obter boas soluções em tempo computacionalmente reduzido, tornando-o mais apto a ser um método alternativo eficaz para a obtenção de soluções de forma rápida e com comportamento regular. Os trabalhos futuros também incluem avaliar possibilidades para integrar a metodologia que trata as sobreposições à metodologia que gera o planejamento, dado que até o momento, essa metodologia é feita como um pré-processamento e pode influenciar na qualidade da solução final a ser obtida.

Pretende-se também avaliar a possibilidade de relaxar a condição de descarregamento completo das imagens, o que permitiria 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, os dados restantes poderiam ser incluídos no próximo planejamento, com uma prioridade mais alta de forma a aumentar a probabilidade de concluir rapidamente o descarregamento total daqueles alvos. Além disso, seria interessante avaliar a qualidade das soluções obtidas, tanto com o GRASP quanto com o *Simulated Annealing*, quando comparadas à solução ótima, mesmo que para instâncias menores, utilizando o modelo matemático apresentado em [Pinto *et al.* 2024].

## Referências

- BRASIL. Agência Espacial Brasileira. Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE): 2022-2031. Brasília: Agência Espacial Brasileira, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/programa-nacional-de-atividades-espaciais>. Acesso em Maio 2025.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas. Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE). Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2018. 36 p. Disponível em: [https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/legislacao/emcfa/publicacoes/doutrina/md20a\\_sa\\_01a\\_programaa\\_estrategicoa\\_dea\\_sistemasa\\_espaciaisa\\_pesae\\_ed-2018.pdf](https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/legislacao/emcfa/publicacoes/doutrina/md20a_sa_01a_programaa_estrategicoa_dea_sistemasa_espaciaisa_pesae_ed-2018.pdf). Acesso em Maio 2025.
- Castaing, J. (2014). Scheduling Downloads for Multi-Satellite, Multi-Ground Station Missions. In *28º Annual AIAA/USU. Conference on Small Satellites*.
- CCSDS - Consultative Committee for Space Data Systems. Space Packet Protocol. CCSDS 133.0-B-2. 2020. Disponível em: <https://public.ccsds.org/Pubs/133x0b2e1.pdf>. Acesso em Maio 2025.
- 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>
- Feo, T. A.; Resende, M. G. C. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, v. 8, n. 2, p. 67-71, 1989.
- 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.
- ICEYE. ICEYE Product Documentation. Disponível em: <<https://sar.iceye.com>>. Acesso em Maio 2025.
- López-Ibáñez, M.; Pérez Cáceres, L.; Dubois-Lacoste, J.; Stützle, T.; Birattari, M. The IRACE package: Iterated racing for automatic algorithm configuration. *Operations Research Perspectives*, v. 3, p. 43-58, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.orp.2016.09.002>
- 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., 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 *LV SBPO*, São José dos Campos, SP.
- Pinto, M. J.; Pola, H.; Belderrain, M. C. N.; Hayashi, A. C. I.; Kuck, T. N.; Shiguemori, E. H. (2024). Modelo matemático para otimização do planejamento para *download* de dados obtidos por múltiplos satélites para múltiplas estações de solo: nova abordagem. In *LVI SBPO*, Fortaleza - CE.
- Pola, H.; Pinto, M. J.; Belderrain, M. C. N. (2024). Otimização do planejamento de *download* de imagens obtidas por satélites de observação da Terra utilizando *Simulated Annealing*. In *XXVI SIGE (Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa)*, São José dos Campos - 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.