ISSN: 1983 7402 ITA, 01 a 03 OUT 2024

# Otimização do Planejamento de *Download* de Imagens obtidas por Satélites de Observação da Terra utilizando *Simulated Annealing*

Hiawata Pola[1], Maria José Pinto[2], Michael Carmen Neyra Belderrain[1]
[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil
[2]Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

***Resumo* – Esse trabalho trata a otimização do planejamento de *download* das imagens obtidas por múltiplos satélites de observação da terra, que serão descarregadas para diferentes estações de solo, em um dado horizonte de planejamento. O objetivo é maximizar a quantidade de imagens descarregadas, permitindo sua segmentação para que sejam alocadas nas janelas de acesso entre os satélites e as estações de solo. Para isso, são aplicados métodos da Pesquisa Operacional de solução aproximada, mais especificamente, a metaheurística *Simulated Annealing* que utiliza como solução inicial, a solução obtida pelo método GRASP (do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*). A metodologia proposta é apresentada juntamente com resultados exploratórios para validação do modelo e análise dos parâmetros de controle da metaheurística.**

***Palavras-Chave* – *Simulated Anealling*, Sistemas de Observação da Terra, Planejamento de *Download* de Dados de Satélites.**

## I. INTRODUÇÃO

O crescimento das aplicações e desenvolvimento das tecnologias espaciais é perceptível nos dias atuais. Como decorrência dessa evolução, gera-se riqueza e desenvolvimento tecnológico às nações que nelas investem. Esse é o reflexo de uma sociedade cada vez mais consumidora de bens e de serviços espaciais, configurando uma dependência acentuada dessa vertente econômica e tecnológica [1]. Nesse contexto, esse trabalho foca na otimização do planejamento para o *download* dos dados de imagens obtidas por satélites de observação da terra (OBT) para as estações de solo, à luz dos atuais protocolos e condições de operação.

A otimização do planejamento para o *download* dos dados de imagens obtidas por satélites OBT vem sendo cada vez mais discutida na literatura, ao passo que os avanços citados do setor progridem. Busca-se planejar de maneira eficiente o agendamento da alocação dos dados ao longo das diversas oportunidades de contato entre os satélites e as estações (janelas de acesso), as quais são estabelecidas, principalmente, pela trajetória do satélite e pela posição das estações no solo.

Esses dados (imagens) são originalmente obtidos pelos sensores a bordo dos satélites após a aquisição dos alvos situados na superfície terrestre, sendo então armazenados e transmitidos oportunamente nas janelas de acesso. As missões OBT são executadas, em sua maioria, por satélites de órbita baixa (LEO, do inglês *Low Earth Orbit*), operando entre 500 e 2.000 quilômetros de altitude [2] e, geralmente, envolvendo constelações satelitais e múltiplas estações de solo, o que pode gerar uma grande quantidade de janelas de acesso.

H. Pola, hiawata.pola@ga.ita.br; M. J. Pinto, mariajosemjp@fab.mil.br; M. C. N. Belderrain, carmen@ita.br.

O tempo de cada uma dessas janelas é da ordem de 10 minutos de duração, em média, com grande variância desse valor. O volume de dados das imagens, por sua vez, é relativamente elevado. De acordo com [3], este volume reside em torno de 4 *Gbytes*, sendo que as capacidades mais altas de transmissão entre os dispositivos estão na ordem de 800 Mbps, utilizando-se principalmente de banda-X. Uma das características específicas para essas operações é a necessidade da estação acompanhar a trajetória do satélite ao longo da passagem, garantindo assim o enlace correto entre os dispositivos durante a janela de acesso. Por esse motivo, as estações permitem a recepção de dados das imagens de apenas um satélite por vez, condição que configura a "exclusividade de serviço" à estação e ao satélite. Por consequência, é necessário considerar um tempo de *setup* para que a estação alterne entre satélites distintos, principalmente, quando as janelas estão próximas ou sobrepostas no horizonte de planejamento.

Sob o ponto de vista da organização e transmissão dos dados entre os dispositivos envolvidos, devem ser respeitados os protocolos internacionais de "empacotamento", denominados *Space Packet Protocol* (SPP). Esses protocolos têm carácter recomendatório e são emitidos pelo *Consultative Committee for Space Data Systems* (CCSDS). Suas práticas objetivam maior interoperabilidade, eficiência e confiabilidade nas comunicações e trocas de dados no espaço, ao definir a estrutura de empacotamento e fluxo desses dados [4]. Por esse motivo, são utilizados pelas principais organizações do setor, como a NASA, ESA, Roscosmos e JAXA.

Esses protocolos definem que os dados serão tramitados em pacotes, que podem ter comprimento variável, possuindo cabeçalhos de identificação. Sua composição é estruturada em um cabeçalho primário (obrigatório) que indica o fluxo daquele pacote, ao discriminar origem, destino e tipo. O segundo campo é um cabeçalho secundário (opcional) que pode acrescentar informações adicionais ao pacote, como "tempo" por exemplo. O restante é destinado efetivamente aos dados úteis, no caso, dados das imagens.

Frente a esse cenário e às modernas características de operação, com o aumento do número de satélites e de estações, torna-se crucial desenvolver abordagens dinâmicas que possam lidar também com a segmentação e o *download* desses dados. Para isto, é importante otimizar o uso das janelas de acesso, considerando não somente qual imagem será descarregada e em qual janela, como também como será efetivada a segmentação dos dados visando obter planejamentos que resultem em uma melhor utilização dessas janelas.

O artigo está organizado em uma introdução com a descrição do problema e seu contexto, apresentando as características básicas que basearam a abordagem proposta;

em como o problema é tratado na literatura; na maneira como esse trabalho irá considerar e resolver o problema; em um estudo sucinto do comportamento do algoritmo por meio de alguns testes computacionais para validação da metodologia proposta; nas conclusões do trabalho onde são também são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

## II. METAHEURÍSTICAS

As metaheurísticas são algoritmos heurísticos genéricos de solução aproximada, capazes de lidar com diferentes tipos de problemas. Os Algoritmos Genéticos (GA), *Simulated Annealing* (SA), *Particle Swarm Optimization* (PSO) são exemplos de metaheurísticas bem estabelecidas na literatura. Elas, em sua maioria, aplicam mecanismos de busca baseados em fenômenos físicos ou biológicos para explorar o espaço de soluções, alternando entre buscas locais e globais. Esses mecanismos, geralmente, possuem aspectos aleatórios em sua rotina, obtendo assim boas soluções mesmo que não garantindo a otimalidade [5].

Nesse trabalho, a metaheurística *Simulated Annealing* foi aplicada como método principal de busca, partindo de uma solução GRASP gerada no início do processo. Optou-se por métodos de solução única por serem mais simples na manutenção da viabilidade das soluções ao longo das iterações para o problema em questão.

O GRASP foi proposto por Feo e Resende em 1989 [17] e baseia-se na ideia de gerar soluções semi-gulosas de maneira construtiva ao longo das iterações do algoritmo. O método foi projetado para funcionar em duas fases principais: a construção de uma solução inicial e uma posterior busca local. Seu conceito é combinar aleatoriedade e estratégias gulosas para explorar o espaço de soluções através da *Restricted Candidate List* (RCL). A RCL é a lista definida por um parâmetro $\alpha$, a qual restringirá as vizinhanças viáveis que podem ser exploradas a partir da solução parcial, elencadas sob um critério guloso. De acordo com o tamanho da lista, aumenta-se a probabilidade de serem efetivados os movimentos mais gulosos, ou permite-se uma construção mais aleatória. Sua aplicação comumente é associada às abordagens de múltiplas execuções guardando a melhor solução obtida no processo. O GRASP é conhecido por ser uma técnica eficiente e simples para encontrar soluções de alta qualidade em um tempo relativamente reduzido.

O SA, por sua vez, foi proposto por Kirkpatrick em 1983 [6] e se inspira no processo de recozimento dos metais, onde o material é aquecido até uma temperatura elevada e, em seguida, resfriado lentamente. Projetado para possuir poucos parâmetros de controle, a saber, temperatura inicial, taxa de resfriamento e temperatura final. O SA será iniciado por uma solução inicial e uma temperatura inicial alta que irá ser gradativamente ser reduzida. Em cada iteração, uma nova solução é gerada a partir da solução atual, através de uma pequena perturbação, podendo ser aceita ou recusada para passar a ser a corrente, com base em sua função de custo e uma probabilidade que dependerá da temperatura do SA naquela iteração. Se a nova solução for melhor, ela é aceita como a nova solução atual. Se for pior, pode ainda ser aceita com uma probabilidade *p(e)*, segundo a função exponencial de Boltzmann (1):

$$p(e) = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) \quad (1)$$

onde $\Delta E$ é a diferença na função de custo das soluções e $T$ é a temperatura da iteração. A maneira como a temperatura é gerenciada ao longo das iterações permite que o algoritmo tenha grandes chances de explorar globalmente o espaço de soluções no seu início, com pouca probabilidade de prender-se em ótimos locais. E, gradativamente, conforme a temperatura diminui, o algoritmo irá focar em regiões mais promissoras do espaço de busca, aceitando melhoras pontuais em boas regiões.

Por se tratar de uma metaheurística de solução única, o SA é geralmente preferido para problemas onde uma boa solução pode ser encontrada explorando incrementalmente as vizinhanças de soluções atuais e, onde uma solução otimizada é desejada rapidamente, estando a qualidade de seu desempenho atrelada, como nas demais metaheurísticas, à escolha correta de seus parâmetros de controle [7].

## III. REVISÃO DA LITERATURA

Comprovadamente classificado como NP-difícil [8], a literatura trata o problema de otimização de *download* através de métodos de solução aproximada, contudo, com diferentes abordagens.

Numa primeira abordagem, a literatura busca otimizar a capacidade de transmissão de dados ao longo do planejamento, sem necessariamente controlar quais dados estão sendo descarregadas durante as janelas de acesso, ou seja, busca maximizar a quantidade de dados transmitidos ao longo das janelas. Além disso, considera os conflitos entre janelas e períodos de menor probabilidade de sucesso de transmissão. Essa abordagem pode ser observada em trabalhos como [9], que comparam uma heurística gulosa com busca local e um GA para otimização do *scheduling* de comunicações entre satélites e estações de solo gerenciados pela U.S. *Air Force Satellite Control Network* e [10], onde é proposto um modelo para tratar o problema que o autor intitula *Multiple-Satellite, Multiple Ground Station Schedulling Problem* (MMSP), considerando também restrições referentes à energia necessária para execução das tarefas, assim como em [11], porém, restrito a um satélite. Em [10]-[11] a resolução utiliza técnicas de *branch-and-bound* frente a cenários reais de operação.

Numa segunda abordagem, o conteúdo dos dados que, no contexto deste trabalho, são as imagens, passam a ser tratadas de forma individualizada, buscando maximizar a quantidade de imagens descarregadas integralmente, sem possibilidade ainda de segmentação. Sob essa ótica, Karapetyan *et al.* [12] consideram prioridades distintas de descarregamento entre essas imagens, em um cenário de satélite único e várias estações, cujo objetivo é minimizar o atraso de execução de todos os descarregamentos em um horizonte de planejamento de 24h. Observamos forma semelhante de abordar o problema em [13], onde considera-se, adicionalmente, haver custos distintos entre as diferentes estações, havendo uma

penalização na função objetivo para modelar esta condição. O objetivo é maximizar o somatório de prioridades das imagens efetivamente agregadas ao planejamento, não permitindo atrasos na sua entrega. Em ambos, são aplicadas heurísticas construtivas gulosas, associadas a variações de GA's para refinamento das soluções.

No contexto do presente trabalho, a revisão de literatura recente revela uma crescente preocupação com a eficiência do armazenamento e descarregamento de dados das imagens, em concordância aos protocolos CCSDS, permitindo a alocação dos pacotes ao longo das janelas de acesso. Um dos primeiros trabalhos a tratar o problema desta forma foi [14], onde uma heurística baseada em relaxação Lagrangeana é desenvolvida para maximizar a alocação dos pacotes de dados com prioridades distintas ao longo das janelas de acesso. A abordagem foi implementada e utilizada pelo operador italiano de sistema de satélites GALILEO, fornecendo soluções para problemas em larga escala. Mais recentemente, *Chen et al.* [15] abordam a complexidade do agendamento de transmissão de dados de satélites OBT, introduzindo requisitos de transmissão orientados por tópicos dos dados. À medida que se atrasa a entrega, o custo de cada tópico recebe uma penalização baseada em uma função logarítmica. Os autores propõem um modelo matemático para este problema e hibridizam um PSO com mecanismos do GA para troca de informações entre os indivíduos para solucioná-lo de forma heurística. Já em [16] o problema é tratado permitindo a segmentação das imagens e seu empacotamento, em uma otimização biobjetiva, quais seja, maximizar o sucesso de descarregamento das imagens completas maximizando o equilíbrio da utilização das janelas disponíveis. Os autores denominam o problema de DSIDSP (do inglês, *Dynamic Satellite Image Data Downlink Scheduling Problem*) e, para resolvê-lo, desenvolvem um algoritmo adaptativo de otimização biobjetiva, denominado NSGA2ALNS. Este algoritmo combina a busca adaptativa em grandes vizinhanças (ALNS, do inglês *Adaptative Large Neighborhood Search*) com o GA de ordenação não dominada II (NSGA-II, do inglês *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*). O DSIDSP considera, explicitamente, a segmentação dos dados como um fator chave para otimizar o desempenho do sistema, destacando como a segmentação pode afetar a priorização e a seleção de dados durante as janelas de acesso.

Esses avanços indicam um reconhecimento da necessidade de abordar o problema sob a ótica da segmentação de dados, não apenas fornecendo um melhor gerenciamento de armazenamento, mas também permitindo uma programação mais flexível e eficiente dos *downloads*. Nesse sentido, esse trabalho irá tomar como base a proposta apresentada em [16], ao aplicar alternativamente o SA como metaheurística principal de otimização.

## IV. RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

A formalização e resolução do problema baseiam-se nas seguintes premissas:

a) O objetivo do problema é maximizar a quantidade de imagens alocadas por completo, associadas as respectivas prioridades de cada imagem, permitindo sua segmentação ao longo das janelas de acesso. Desta forma, ou uma imagem é totalmente descarregada, ou não estará presente no planejamento, impedindo alocações parciais. Com isso, a avaliação de cada solução é feita ao contabilizar o somatório de prioridades agregadas a aquela solução;
b) Para cada imagem, é atribuído um valor de prioridade *"Pr"*, representando o valor ponderado que o descarregamento completo de uma determinada imagem irá agregar no planejamento;
c) Cada imagem possui um *due-time*, que configura o instante limite para que a imagem seja descarregada dentro do horizonte de planejamento. Entretanto, neste trabalho, este limite poderá ser extrapolado, mas a partir do *due-time*, o valor do descarregamento da imagem na função objetivo, valor de *"Pr"*, é penalizado segundo uma função exponencial decrescente a partir do seu valor original, se aproximando de "zero" ao término do horizonte de planejamento, caso o *due-time* seja totalmente extrapolado;
d) Cada imagem poderá ser alocada apenas uma vez no planejamento, não permitindo múltiplas alocações da mesma imagem;
e) Tanto estações quanto satélites possuem exclusividade no serviço, ou seja, são capazes de receber/transmitir dados com um dispositivo por vez;
f) Para cada satélite, de acordo com sua taxa de transferência, existe um limite inferior e superior de segmentação das imagens, que devem ser respeitados para particionamento dos dados originais. Estes limites correspondem à duração necessária para que aquele satélite transmita o menor pacote e o maior pacote previsto nos protocolos CCSDS, respectivamente;
g) Todos os segmentos alocados em uma mesma janela não podem exceder a duração daquela janela;
h) É considerado um tempo de *setup* para que uma estação esteja pronta para receber dados de diferentes satélites, quando existem sobreposições entre janelas de uma mesma estação e satélites distintos. Assume-se um valor fixo para cada estação, independente do satélite que estiver fazendo o *download* de seus dados. Estas sobreposições serão denominadas do Tipo 1;
i) Durante a passagem, os satélites poderão descarregar para estações distintas mesmo que as respectivas janelas estejam sobrepostas. Mas, diferentemente da premissa anterior, não será considerado um tempo de *setup* para a alternância entre as estações, pois considera-se que este tempo não é significativo. Neste caso, as janelas não serão consideradas integralmente, pois o satélite irá, em algum ponto, alternar sua transmissão de uma estação para a outra. Estas sobreposições serão denominadas do Tipo 2;
j) Os casos de sobreposições do Tipo 1 e do Tipo 2 serão tratados para todo par de janelas, ou seja, caso ocorram sobreposições, elas serão tratadas duas a duas.

Com base nessas premissas, os conjuntos e parâmetros considerados para o problema estão descritos a seguir.

Conjuntos

- $I$ : conjunto de imagens.
- $J$: conjunto de janelas de acesso.
- $GS$: conjunto de estações de solo.
- $S$: conjunto de satélites.

Parâmetros

- *HP*: Horizonte de Planejamento
- $T_i$ : tempo de processamento necessário para descarregar a imagem $i$.
- $Pr_i$ : prioridade da imagem $i$.
- $DT_i$ : *due-time* da imagem $i$.
- $Et_j$: instante final da janela $j$.
- $St_j$: instante inicial da janela $j$.
- $Dur_j$: duração da janela $j$.
- $S_i$: satélite que adquiriu a imagem $i$.
- $Tr_s$: taxa de transferência do satélite *s* em Mbps.
- $setup_{gs}$: tempo de *setup* necessário para que a estação $gs$ possa alternar o recebimento de dados de diferentes satélites.
- $seg_{S_i}^{min}$ e $seg_{S_i}^{max}$: segmento mínimo e máximo permitido pelo satélite $S_i$.

A variável de decisão é representada por $x_{ij} \in \mathbb{R}_+$, que corresponde ao segmento, em unidade de tempo, que a imagem *i* ocupa na janela *j*. Em conformidade com a premissa "a", é necessário também adicionar uma variável auxiliar $y_i$ binária, que indica se a imagem *i* é completamente alocada no planejamento ($y_i = 1$); ou não ($y_i = 0$). Esta variável é definida de acordo com as equações (2).

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = T_i \cdot y_i \quad \forall i \in I \tag{2}$$

Como comentado anteriormente, será permitido que ocorra um atraso no descarregamento completo de uma imagem. Buscando reduzir este atraso, a prioridade de cada imagem será ajustada, a cada iteração/solução do método, através da função exponencial decrescente representada em (3).

$$Pr_i' = \begin{cases} Pr_i & se\ Et_i' \leq DT_i, \forall i \in I \\ Pr_i \cdot e^{-\lambda(Et_i' - DT_i)} & se\ Et_i' > DT_i, \forall i \in I \end{cases} \tag{3}$$

onde: $Et_i'$ indica, para cada iteração/solução do método, o instante final da última janela utilizada para descarregar a imagem *i*.

A variável $Pr_i'$ é então definida com base na variável $Et_i'$. Sendo assim, se $Et_i'$ for menor ou igual à $DT_i$, a prioridade da imagem permanece $Pr_i$. Mas, se $Et_i'$ exceder $DT_i$, a prioridade é ajustada para refletir a penalização devido ao atraso.

A restrição relacionada à segmentação descrita no item "f", está representada em (4).

$$seg_{S_i}^{min} \leq x_{ij} \leq seg_{S_i}^{max} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{4}$$

Sendo assim, em cada arranjo de segmentação encontrado para uma imagem *i*, nenhum segmento poderá ser inferior à $seg_{S_i}^{min}$ ou superior à $seg_{S_i}^{max}$.

Para resolução do problema, optou-se por representar as soluções por matrizes, cujo o número de linhas corresponde ao número de imagens a serem alocadas e, o número de colunas, corresponde ao número total de janelas distribuídas em *HP*. Adicionou-se uma coluna auxiliar para indicar se a imagem foi alocada no planejamento ou não, conforme variável $y_i$. A Fig. 1 ilustra a representação de uma matriz solução.

| Img | Plan | Janela 1 | Janela 2 | Janela 3 | Janela 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 35 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 337 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 54 | 0 | 0 | 46 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 324 | 30 |

Fig. 1. Representação de matriz solução para uma instância ilustrativa contendo 5 imagens e 4 janelas de acesso.

Os valores alocados em cada célula da matriz solução, a partir da segunda coluna, representam os segmentos da variável $x_{ij}$ presentes na solução, ou seja, o tempo (em segundos) que cada imagem utilizou do tempo total de cada janela de acesso.

A partir desta representação, a metodologia de otimização proposta é composta por três fases:

**Fase I** - Para lidar com as sobreposições, um algoritmo determinístico de solução exata é aplicado como um pré-processamento das janelas de acesso, onde o objetivo é redimensionar, de forma otimizada, estas janelas de forma a suprimir as sobreposições. Para cada janela de acesso, utiliza-se o modelo matemático (5)-(8), o qual busca maximizar o tamanho final destas janelas ($Dur_j$) levando em consideração as sobreposições, ponderado por $Tr_j$ e $Pr_j^{sum}$ 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.

$$Max \quad \sum_{j \in J} \left(Tr_j \times Pr_j^{sum}\right) Dur_j \tag{5}$$

s.a.:

$$Dur_j = end_j - start_j \quad \forall j \in J \tag{6}$$

$$start_k \geq end_j + setup_{gs}, j, k \in \mathrm{J}, St_j < St_k,\ G_j = G_k \tag{7}$$

$$start_k \geq end_j, \quad j, k \in \mathrm{J}, St_j < St_k, \quad SS_j = SS_k \tag{8}$$

onde:

$G_j$ corresponde às janelas *j* que podem ser utilizadas para o descarregamento de imagens de diferentes satélites em

períodos sobrepostos; $SS_j$ corresponde às janelas *j* que podem receber os dados de um mesmo satélite também em períodos sobrepostos; $start_j$ e $end_j$ correspondem aos novos instantes no horizonte de planejamento que correspondem ao início e ao término da janela *j* após o pré-processamento.

Desta forma, o modelo matemático (5)-(8) 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. Além disso, as restrições (7) tratam os casos onde existe sobreposição do Tipo 1 e as restrições (8) os casos onde existe sobreposição do Tipo 2.

**Fase II** - Com o redimensionamento das janelas após a Fase I, a solução inicial é gerada por meio de um processo construtivo semi-guloso baseado na metodologia GRASP [18]. Para essa construção ajusta-se o quão guloso será o algoritmo por meio de um fator $\alpha$, ao definir tamanho da lista de imagens candidatas, podendo considerar todas as imagens ou apenas as de maior lucro para o planejamento. Sendo assim, elenca-se as imagens por maior *Pr* e menor *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.

**Fase III** - A partir da solução inicial gerada na Fase I, o SA é aplicado no intuito de refiná-la, buscando melhorias a partir de 3 estruturas de vizinhanças:

- Retirar uma imagem aleatória por completo do planejamento;
- Selecionar imagens de maior *Pr* e menor *DT* ausentes no planejamento e tentar alocá-las nos espaços disponíveis das janelas; e
- Redimensionar segmentos de uma mesma imagem, ao selecionar uma imagem aleatoriamente e, entre pares de janelas aleatórias disponíveis para esta imagem, transferir tudo quanto for possível entre estas janelas.

A cada iteração, uma das estruturas de vizinhança é selecionada aleatoriamente, efetuando uma perturbação local na solução corrente. A melhor solução encontrada ao longo de toda a busca é guardada e, ao final, entregue como resultado.

## V. TESTES COMPUTACIONAIS

Serão apresentados os testes e análises realizadas utilizando uma instância de teste contendo 30 imagens, 4 satélites e 2 estações, resultando em 10 janelas de acesso. Os dados de entrada foram gerados artificialmente para validação da metodologia proposta. O volume de dados das imagens em *bits* e a taxa de transferência de cada satélite seguem os parâmetros de operação descritos na Seção II, com variância na ordem de 20%. A cada imagem foi atribuída uma prioridade (*Pr*) entre 1 e 10 e *due-time* (*DT*) distintos limitados ao *HP*. Esses valores foram gerados aleatoriamente segundo uma distribuição normal. Os valores de $setup_{gs}$ têm duração de 4 minutos, aproximadamente, equivalente ao tempo de descarregamento de uma imagem média, impactando assim, diretamente na alocação das imagens. Os parâmetros $seg_{S_i}^{min}$ e $seg_{S_i}^{max}$ 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.

Os resultados são analisados graficamente nas Figs. 2-4, onde o eixo *x* representa a iteração do algoritmo e o eixo y, o valor da função que avalia a solução ao contabilizar o somatório de prioridades agregadas a aquela solução corrente. Cada coloração de linha corresponde ao resultado de uma execução do algoritmo.

A primeira análise se refere à capacidade do algoritmo em buscar boas soluções a partir de soluções iniciais distintas geradas pelo método GRASP. Para isso, foi elaborada uma representação gráfica da convergência para execuções completas do algoritmo sob os mesmos parâmetros, alterando unicamente a semente de cada simulação de forma aleatória. Esses resultados são apresentados na Fig. 2.

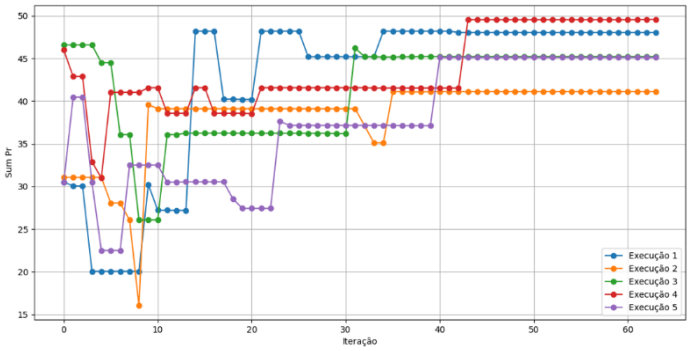


Fig. 2. Representação gráfica para curva de convergência do algoritmo para sementes distintas.

As curvas de convergência para as 5 execuções indicam uma capacidade do SA ser efetivo em explorar o espaço de busca obtendo melhores soluções em comparação à solução inicial. Destaca-se que o processo GRASP já obtém boas soluções, ao passo que constrói de maneira semi-gulosa uma solução viável. Os parâmetros utilizados para geração desses resultados foram a temperatura inicial de 250, a taxa de resfriamento de 0.85 e temperatura final de 0.01. Para o GRASP, o $\alpha$ utilizado foi de 0.9, o que garante uma grande variabilidade para as soluções iniciais do algoritmo.

Com relação aos parâmetros de controle da metaheurística, os fatores que impactam diretamente nos resultados do SA são as configurações de sua temperatura inicial e a taxa de resfriamento. Serão apresentadas as curvas de convergência com a alteração sistemática desses parâmetros. As Figs. 4 e 5 referem-se a simulações onde a semente foi fixada, alterando unicamente a temperatura inicial e a taxa de resfriamento, respectivamente. Para o restante dos parâmetros, a temperatura final permaneceu em 0.01 para ambos os casos, mantendo $\alpha =$ 0.9 para o GRASP. Cada coloração de linha corresponde a uma execução com um dos parâmetros sistematicamente alterados.

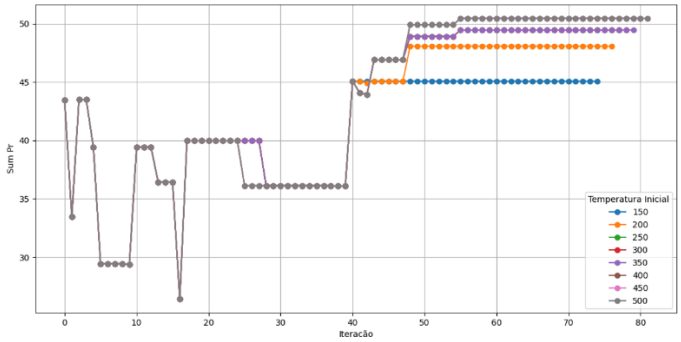


Fig. 3. Representação gráfica para curva de convergência do algoritmo para temperaturas iniciais distintas.

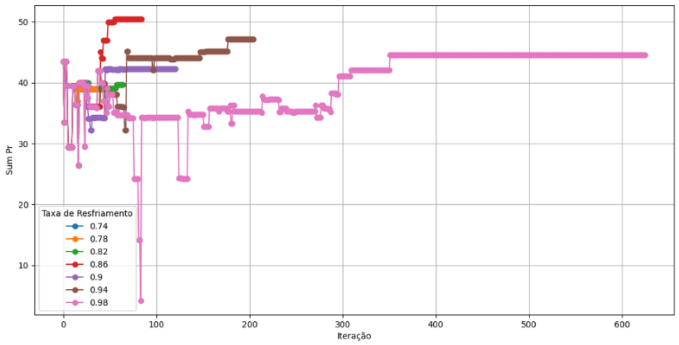


Fig. 4. Representação gráfica para curva de convergência do algoritmo para taxas de resfriamento distintas.

O gráfico da Fig. 3 apresenta 8 execuções do algoritmo com mesma solução inicial e parâmetros de controle. A temperatura inicial recebeu incrementos de 50 a partir de 150 até 500. Os resultados indicam que, para essa instância, os processos decisórios de busca iniciais pouco foram influenciados, porém, ao término do processo, os resultados divergem, sugerindo que temperaturas mais altas no início permitem que o SA continue explorando de maneira mais diversificada ao se aproximar da temperatura final. Para os 7 testes alterando as taxas de resfriamento, de 0.74 até 0.98 com incrementos de 0.4, as curvas da Fig. 4 sugerem que valores intermediários, próximos a 0.9, permitem que o SA explore mais eficientemente o espaço de soluções, reduzindo o risco do algoritmo ficar preso em mínimos locais. Nota-se que com a taxa mais alta, 0.98, o SA permaneceu preso em um mínimo local até que o critério de parada fosse atingido.

## VI. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma metodologia que otimiza o problema baseado no DSIDSP, recentemente proposto por [16] por meio do SA sob critério mono-objetivo de avaliação das soluções. Com isso, uma apresentação das principais características do problema e as condições incorporadas à metodologia proposta foram pontuadas. Nesta metodologia, busca-se gerar planejamentos otimizados utilizando o SA como rotina principal de busca de soluções, lidando inicialmente com as sobreposições das janelas em um pré-processamento otimizado, para então passar efetivamente para o problema de alocação das imagens às janelas de acesso. Os resultados preliminares indicam um bom fator de convergência do algoritmo independente da solução inicial. Entretanto, ressalta-se que os parâmetros de controle da metaheurística devem ser ajustados para a obtenção de boas soluções. Como trabalhos futuros, pretende-se realizar novos testes computacionais buscando a exploração de novas instâncias e o aprimoramento das estruturas de vizinhanças consideradas para o algoritmo, a fim de uma análise mais aprofundada de seu desempenho para contextos reais de planejamento.

## REFERÊNCIAS

[1] AEB. "Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE): 2012-2021." Brasília (2012). [Online]. Disponível em: http://portal-antigo.aeb.gov.br/wp-content/uploads/2013/03/PNAE-Portugues.pdf. Acesso em: 20/06/24.

[2] Y. Li, M. Wang, K. Hwang, Z. Li, T. Ji, "LEO Satellite Constellation for Global-Scale Remote Sensing With On-Orbit Cloud AI Computing," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 16, p. 9369-9381, 2023.

[3] B. Eilertsen, "Ground station networks vs. GEO relay satellite systems for polar orbiting satellites," in Conference SpaceOps 2012, 2012. doi: 10.2514/6.2012-1290826.

[4] CCSDS - Consultative Committee for Space Data Systems. "Space System Data Protocol (SSP)." Washington, DC, USA, 2023. [Online]. Disponível em: https://public.ccsds.org/Pubs/133x0b2e1.pdf. Acesso em: 15/07/24.

[5] A. Levada, "Projeto e Analise de Algoritmos," 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.22901.04323/3.

[6] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science (New York, N.Y.), vol. 220, p. 671-680, 1983. doi: 10.1126/science.220.4598.671.

[7] Z. Michalewicz and D. B. Fogel, How to Solve It: Modern Heuristics. Springer, 2004. ISBN: 978-3540660613.

[8] A.J. Vazquez Alvarez and R.S. Erwin, An Introduction to Optimal Satellite Range Scheduling, Springer, 2015.

[9] L. Barbulescu, A. E. Howe, J. P. Watson, and L. D. Whitley, "Satellite range scheduling: A comparison of genetic, heuristic and local search", Germany, 2002, p. 611-620.

[10] J. Castaing, "Scheduling Downloads for Multi-Satellite, Multi-Ground Station Missions," in 28° Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, *2014*.

[11] P. S. Spangelo, J. Cutler, K. Gilson, and A. Cohn, "Optimization-based scheduling for the single-satellite, multi-ground station communication problem," Computers & Operations Research, vol. 57, p. 1-16, 2015. doi: 10.1016/j.cor.2014.11.004.

[12] D. Karapetyan, S. M. Mitrovic, K. T. Malladi, and A. P. Punnen, "Satellite downlink scheduling problem: A case study," OMEGA - The International Journal of Management Science, vol. 53, p. 115-123, 2015.

[13] B. Song, F. Yao, Y. Chen, and Y. Chen, "A Hybrid Genetic Algorithm for Satellite Image Downlink Scheduling Problem," Discrete Dynamics in Nature and Society, 2018, p. 1-11. doi: 10.1155/2018/1531452.

[14] F. Marinelli, S. Nocella, F. Rossi, and S. Smriglio, "A Lagrangian heuristic for satellite range scheduling with resource constraints," Computers & Operations Research, vol. 38, p. 1572-1583, 2011. doi: 10.1016/j.cor.2011.01.016.

[15] H. Chen, B. Zhai, J. Wu, C. Du, and J. Li, "A Satellite Observation Data Transmission Scheduling Algorithm Oriented to Data Topics," International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2020, p. 1-16, 2020. doi: 10.1155/2020/2180674.

[16] C. Zhongxiang, A. Punnen, and Z. Zhou, "An adaptive bi-objective optimization algorithm for the satellite image data downlink scheduling problem considering request split," 2022. doi: 10.48550/arXiv.2207.00168.

[17] T. Feo and M. G. C. Resende, "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures," Journal of Global Optimization, vol. 6, p. 109-133, 1995. doi: 10.1007/BF01096763.