

# Vortex Search para Otimizar o Planejamento para Download de Dados considerando Múltiplos Satélites e Múltiplas Estações de Solo

Hiawata Pola<sup>1,3</sup>, Maria José Pinto<sup>2</sup>, Michael Carmen Neyra Belderrain<sup>1</sup>, Ana Cláudia Iwazaki Hayashi<sup>2</sup>, Tahisa Neitzel Kuck<sup>2</sup>, Élcio Hideiti Shiguemori<sup>2</sup>, Matheus Rodrigues Gotelip<sup>3</sup>, Guilherme Moura Delfino<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>2</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>3</sup>Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE), Brasília/DF – Brasil

**Resumo** – Esse trabalho trata do planejamento para *download* das imagens adquiridas por múltiplos satélites para diferentes estações de solo, em um dado horizonte de planejamento, buscando maximizar a quantidade de imagens descarregadas mediante prioridades distintas. O problema busca refletir um cenário operacional buscando considerar, no planejamento, os protocolos de tramitação dos dados no ambiente espacial, além de respeitar tempos de transição quando as respectivas janelas de visibilidade (oportunidades de contato entre os satélites e as estações de solo) se sobrepõem ou estejam próximas. A metaheurística *Vortex Search* é aplicada para resolver o problema e, para analisar o desempenho do método proposto, foram geradas instâncias a partir de condições semelhantes às reais de operação, variando o horizonte de planejamento. Uma comparação com um método proposto anteriormente também será apresentada.

**Palavras-Chave** – Planejamento para *Download* de Dados, *Vortex Search*, Múltiplos Satélites e Múltiplas Estações de Solo.

## I. INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias espaciais segue uma crescente 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. No Brasil, as atividades espaciais são norteadas pelo Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), plano de decênio emitido pela Agência Espacial Brasileira (AEB), que estabelece diretrizes orientando as atividades das entidades ligadas ao setor para o desenvolvimento espacial no País [1].

Nesse contexto, um tipo de missão importante de cunho estratégico, devido às dimensões continentais brasileiras, são as de Observação da Terra (OBT). Essas missões são compostas por satélites em órbita LEO (do inglês, *Low Earth Orbit*), responsáveis por obterem imagens ao longo de sua trajetória, para então serem enviadas às estações de solo e destinadas aos usuários. São amplamente aplicadas no monitoramento da Amazônia legal e de fronteiras, por exemplo, com o intuito de identificar atividades ilícitas nessas regiões. Devido à grande demanda para obtenção de imagens, é comum ocorrer limitações para a coleta, o armazenamento e o descarregamento destas imagens devido a

fatores como o grande volume de dados obtidos ou o conflito entre tarefas a serem realizadas. Nesse sentido, abordagens que otimizem esses processos estão alinhadas com as diretrizes do PNAE [1], dado que buscam garantir um emprego mais eficiente desses recursos, potencializando o sucesso deste tipo de missão.

Por conseguinte, este trabalho busca contribuir com as pesquisas no contexto espacial visando apoiar a tomada de decisão para o planejamento do *download* de diferentes imagens, obtidas por múltiplos satélites, utilizando múltiplas estações de solo, de forma a otimizar o seu descarregamento em um dado horizonte de planejamento.

Para uma melhor identificação do problema, vale ressaltar que, para o sucesso do *download*, é necessário que a estação acompanhe a trajetória do satélite enquanto há possibilidade de contato (janelas de visibilidade). É sabido que as estações responsáveis por essa recepção permitem a comunicação com apenas um satélite por vez, condição que configura a “exclusividade de serviço” à estação. Por conta disso, também será necessário considerar um tempo de *setup* para que a estação alterne a recepção entre satélites distintos, principalmente, quando as janelas estão próximas ou sobrepostas. Além da condição restritiva, referente à estação de solo, deve-se atentar para condição semelhante sob o ponto de vista do satélite, à medida que esse poderá descarregar seus dados de maneira escalonada para estações distintas. Neste caso, não é permitido que um mesmo satélite faça o *download* de dados para estações distintas ao mesmo tempo, no caso, durante o período de sobreposição das janelas. Sob o ponto de vista dessa restrição, o que será considerado neste trabalho é a definição do instante em que o satélite irá alternar a transmissão de uma estação para outra.

Em suma, este trabalho considera que o *download* para uma estação de solo pode ser realizado por diferentes satélites e que um 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 *setup* da estação seja respeitado; e que as sobreposições sejam tratadas, devido a condição de exclusividade de serviço entre satélites e estações.

Outro fator que impacta no planejamento deste tipo de missão é o gerenciamento do fluxo de descarregamento das imagens, de forma a respeitar os protocolos de empacotamento e de transmissão CCSDS [2]. Estes protocolos definem a maneira como serão organizados os dados das imagens ao ser efetivada sua entrega às estações de solo em cada janela de visibilidade disponível. Neste trabalho, considera-se que o *download* dos dados pode ser feito em pacotes com tamanhos variáveis a serem definidos pela otimização. Por conseguinte,

H. Pola, hiawata.pola@ga.ita.br; M. J. Pinto, mariajosemjp@fab.mil.br; M. C. N. Belderrain, carmen@ita.br.; A.C.I. Hayashi, anaclaudiaacih@fab.mil.br; T.N. Kuck, tahisatnk@fab.mil.br; E.H. Shiguemori, elcioehs@fab.mil.br; M.R. Gotelip, gotelipmrg@fab.mil.br; G.M. Delfino, mouragmd@fab.mil.br

os dados brutos das imagens poderão ser segmentados, sendo cada segmento distribuído ao longo das janelas disponíveis.

Além da sobreposição e da forma como os dados são organizados para o *download*, este trabalho também incorpora requisitos distintos entre as imagens, no caso, prioridades e *due time* (último momento possível, dentro do horizonte de planejamento, para que as imagens coletadas estejam disponíveis na estação de solo).

Para resolver este problema, propõe-se a utilização do método *Vortex Search* (VS) [3], cujos resultados são comparados com o *Simulated Annealing* (SA), utilizado para resolver o problema em [4], para fins de análise de desempenho.

As próximas subseções apresentam, respectivamente, uma breve revisão da literatura e o método *Vortex Search*, como proposto em [3]. A definição do problema é apresentada na Seção II e, na Seção III, a metodologia proposta é detalhada. A Seção IV apresenta os testes computacionais realizados e os resultados obtidos e, a Seção V, algumas considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

### A. Revisão da Literatura

A literatura apresenta diferentes abordagens para tratar o planejamento para o *download* de dados. A primeira abordagem busca otimizar a quantidade de dados transmitidos ao longo das janelas de visibilidade, mas não controla quais dados estão sendo efetivamente descarregados, como em [5] e [6]. Em ambos os trabalhos, são consideradas também restrições referentes à energia necessária para execução das tarefas, frente a cenários reais de operação, sendo que, em [6], o planejamento ficou restrito a um satélite.

Na segunda abordagem, as imagens passam a ser tratadas de forma individualizada, mas sem ainda considerar a possibilidade de segmentação no momento do descarregamento, ou seja, busca-se maximizar a quantidade de imagens descarregadas integralmente, como em [7] e [8].

Na terceira abordagem, tem início a preocupação com a eficiência do armazenamento e descarregamento de dados, em concordância aos protocolos CCSDS [2]. Um dos primeiros trabalhos a tratar o problema desta forma foi [9]. Em [10], a segmentação e empacotamento dos dados foram considerados em uma abordagem biobjetiva, onde os autores buscam maximizar o sucesso de descarregamento das imagens completas maximizando o equilíbrio da utilização das janelas disponíveis. Em [4], a metaheurística *Simulated Annealing* (SA) foi aplicada para tratar o problema desta forma e, como comentado anteriormente, será utilizada neste trabalho para comparar os resultados com o *Vortex Search*.

Em [11], um modelo matemático foi proposto para tratar o problema e, como no presente trabalho, visa 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* das imagens. Neste trabalho, também é considerado que o *download* para uma mesma estação de solo pode ser realizado por diferentes satélites, mesmo que as respectivas janelas possuam sobreposição ou estejam próximas, desde que seja respeitado o tempo de *setup* para que a estação alterne o recebimento de dados entre os diferentes

satélites. Uma nova estratégia para modelar o problema foi proposta pelos mesmos autores em [12], onde um modelo mais compacto foi apresentado, passando também a considerar a segmentação variável dos pacotes. Esta nova formulação permitiu, ainda, que um mesmo satélite possa descarregar para diferentes estações de solo, em casos em que existam janelas de visibilidade próximas.

Os trabalhos [9] e [11] consideram a fragmentação em pacotes de dados no descarregamento das imagens armazenadas nos satélites, mas nestes trabalhos, o tamanho dos pacotes é pré-definido e não variável como define o protocolo emitido pelo CCSDS [2]. Em [4], [10], [12] e, no presente trabalho, esta variação é considerada. Inclusive, o trabalho [10] destaca a necessidade de abordar o problema desta forma, dado que fornece um melhor gerenciamento de armazenamento, além de permitir uma programação mais flexível e eficiente dos *downloads*.

### B. Vortex Search

A metaheurística *Vortex Search* (VS) é uma metaheurística inspirada no padrão criado pelo fluxo de vórtices em fluidos, proposta por Doğan e Ölmez [3]. O método tem início com uma solução  $\mu_0$  (centro do círculo inicial) que irá definir o centro do vórtice, além da posição da solução corrente  $S$ . Em seguida, o método irá gerar as soluções candidatas  $C_t$  ( $s$ ) (vizinhos) ao redor desta solução, sendo que  $t$  é o índice da iteração. A cada iteração gera-se  $n$  soluções candidatas ao redor de  $S$ . O valor de  $n$  é fixo para todas as iterações, devendo ser definido pelo usuário. O posicionamento das soluções candidatas ao redor de  $S$  respeita uma distribuição Gaussiana que, devido à sua cauda longa, permite ao algoritmo realizar grandes saltos no espaço, aumentando a probabilidade de escapar de mínimos locais nas iterações iniciais e concentrando-se ao redor de  $S$  nas iterações finais. A cada iteração, poderá ser necessária uma viabilização das soluções para ajustá-las para dentro dos limites do problema. Após a viabilização, as soluções candidatas da iteração  $t$  são avaliadas, sendo  $s'$  a melhor solução dentre as candidatas. Se  $s'$  for melhor que a solução  $S$ ,  $s'$  a substitui, passando a ser a melhor solução obtida até então e, conseqüentemente, o centro do vórtice da próxima iteração. A Fig. 1 ilustra o processo iterativo de busca do VS e a substituição da melhor solução à medida que o raio é diminuído entre as iterações.

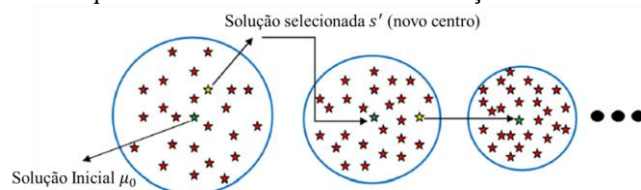


Fig. 1. Ideia geral da rotina de busca do VS, traduzida de [3].

O método é associado à redução do raio do vórtice a cada iteração  $t$  (parâmetro  $r_t$ ), para equilibrar a exploração local e global, limitando o quanto longe da solução corrente o espaço de soluções poderá ser explorado. À medida que o algoritmo progride, o valor deste raio, inicialmente definido como  $r_0$ , será recalculado e, gradativamente reduzido, utilizando a

função Gamma Incompleta Inversa (*gammaincinv*), conforme equações (1)-(3).

$$a_t = a_0 - \frac{t}{Max_{it}} \quad (1)$$

$$r_0 = \sigma_0 \left( \frac{1}{d} \right) \text{gammaincinv}(d, a_0) \quad (2)$$

$$r_t = \sigma_0 \left( \frac{1}{d} \right) \text{gammaincinv}(d, a_t) \quad (3)$$

Na equação (1),  $a_t$  é um parâmetro que irá estabelecer a resolução do tamanho da busca, a cada iteração  $t$ . Este parâmetro será calculado a partir de um valor inicial  $a_0$  (comumente definido como 1) e, em função da relação entre o número máximo de iterações  $Max_{it}$  e a iteração corrente  $t$ . Portanto,  $a_t$  é sensível ao quão próximo do término de execução o algoritmo está. O termo  $Max_{it}$  corresponde ao critério de parada. A equação (2) é responsável por definir o valor de  $r_0$ , utilizando-se do parâmetro  $a_0$  e  $\sigma_0$ , que representa a variância inicial da distribuição, de acordo com limites inferiores e superiores do espaço de busca, que pode ser calculado pela equação (4).

$$\sigma_0 = \frac{MAX(limite superior) - MIN(limite inferior)}{2} \quad (4)$$

A equação (3) é responsável por calcular iterativamente o valor do raio da iteração  $r_t$ , ao utilizar  $a_t$  como parâmetro da função *gammaincinv*. Tanto em (2) quanto em (3),  $d$  será o parâmetro definido para a função que irá determinar o tamanho do passo entre as iterações, ao estabelecer o comportamento geral de decaimento do raio.

A função *gammaincinv* controla o decréscimo do raio e, associada à distribuição Gaussiana, define a localização das soluções candidatas, a cada iteração, com relação à solução corrente. Essa função, portanto, define a intensidade das perturbações, ou seja, o quão distantes potencialmente estarão os vizinhos de  $S$ . Desta forma, devido ao comportamento geral do decaimento do raio ao longo das iterações, ocorre uma busca em larga escala no primeiro terço das iterações e, a partir desse ponto, a busca passa a ser mais localizada.

## II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo do problema é maximizar a quantidade de imagens, obtidas por diferentes satélites, alocadas nas janelas de visibilidade, considerando múltiplas estações de solo. Busca-se ainda atender as prioridades e permitir a segmentação destas imagens. A solução (planejamento gerado) contabiliza o somatório de prioridades agregadas à solução. Além disso, considera-se as seguintes premissas:

- Uma imagem deve ser totalmente descarregada durante o horizonte de planejamento, ou seja, alocações parciais não são permitidas;
- Cada imagem poderá ser alocada apenas uma vez no planejamento;
- Estações de solo e satélites possuem exclusividade no serviço, ou seja, são capazes de receber/transmitir dados com um dispositivo por vez;
- Os segmentos alocados em uma mesma janela não podem exceder a duração daquela janela;
- O tempo de *setup* considerado, para que uma estação esteja pronta para receber dados de diferentes satélites,

quando existem sobreposições entre janelas de uma mesma estação e satélites distintos, será um valor fixo para cada estação, independente do satélite que estiver fazendo o *download*. Estas sobreposições serão denominadas do Tipo 1;

- 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 *setup* para que os satélites alterarem entre as estações, por não ser considerado um tempo significativo. Estas sobreposições serão denominadas do Tipo 2;
- 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;
- Dado o conjunto  $I$  representando o conjunto de imagens a serem descarregadas, 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 em [13], considera-se que o *due time* poderá ser extrapolado, mas que este atraso resultará em uma redução do valor do descarregamento da imagem. Para isto, o valor de  $P_i$  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 (5).

$$P_i' = \begin{cases} P_i & \text{se } E_i' \leq DT_i, \forall i \in I \\ P_i \cdot e^{-\lambda(E_i' - DT_i)} & \text{se } E_i' > DT_i, \forall i \in I \end{cases} \quad (5)$$

onde:  $E_i'$  indica, para cada iteração/solução gerada, 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. Assim, se  $E_i'$  exceder  $DT_i$ , a prioridade será ajustada para refletir a penalização.

A representação da solução do problema foi baseada em [13], onde optou-se por utilizar matrizes, onde o número de linhas corresponde ao número de imagens a ser alocado e, o número de colunas, ao número de janelas de visibilidade distribuídas no horizonte de planejamento. Desta forma, os valores alocados em cada célula da matriz solução, representam os segmentos da imagem  $i$ ,  $i \in I$ , presentes na janela de visibilidade  $j$ ,  $j \in J$  e, consequentemente na solução, que irão corresponder ao tempo (em segundos) que cada imagem utilizou para ser descarregada, em relação ao tempo total da respectiva janela.

## III. METODOLOGIA

Como em [4], a metodologia de otimização proposta é composta por três 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, além de priorizar os satélites que possuem mais imagens prioritárias e com maior capacidade de transmissão. Sendo assim, utiliza-se o modelo matemático (6)-(13), 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.

$$\max \sum_{j \in J} (T_j \times P_j^{sum}) x_j \quad (6)$$

sujeito a:

$$x_j = end'_j - start'_j \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$start'_k \geq end'_j + setup_g \quad j, k \in J; g \in G; start'_j < start'_k \mid G_j = G_k \quad (8)$$

$$start'_k \geq end'_j \quad j, k \in J; start'_j < start'_k \mid S_j = S_k \quad (9)$$

$$start'_j \geq start_j \quad j \in J \quad (10)$$

$$end'_j \leq end_j \quad j \in J \quad (11)$$

$$start'_j \leq end'_j \quad j \in J \quad (12)$$

$$start'_j, end'_j \in \mathbb{R}_+, j \in J \quad (13)$$

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 (6) maximiza o uso ponderado das janelas de visibilidade, levando em consideração  $T_j$  e  $P_j^{sum}$ . As restrições (7) definem a nova duração de cada janela no horizonte de planejamento. As restrições (8) tratam as sobreposições do Tipo 1 onde, para qualquer par de janelas  $k$  e  $j$ , sendo que  $k$  ocorre após  $j$  e são pertencentes à mesma estação  $g$  ( $G_j = G_k$ ), seja contabilizado o tempo de  $setup$  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 (9) 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 (10) e (11) garantem que o início e o término da janela  $j$ , após o pré-processamento, estejam limitados pelos instantes iniciais e finais originais dessa janela e, as restrições (12), que o novo início de cada janela ocorra antes do término desta janela. Por fim, as equações (13) definem o domínio das variáveis de decisão, caracterizando um modelo de programação linear.

**Fase II** - Com o redimensionamento das janelas após a Fase I, uma solução inicial é gerada por meio de uma única execução

do processo construtivo do método GRASP (do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) [14]. Para essa construção, ajusta-se o quão guloso será o algoritmo GRASP por meio de um fator  $\alpha$ , ao definir o tamanho da lista de imagens candidatas a cada iteração. Neste trabalho, elenca-se as imagens por maior  $P$  e desempata-se pelo menor valor de  $DT$ . Ao selecionar uma imagem, associa-se às primeiras janelas disponíveis, 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*.

**Fase III** - A partir da solução inicial gerada na Fase II, o VS é aplicado no intuito de refiná-la e obter melhorias. A implementação do VS partiu da estrutura padrão proposta em [3] e detalhada na subseção B da Seção I deste trabalho. Nesse trabalho, a distribuição Gaussiana é utilizada para definir a intensidade das perturbações, ou seja, quantas perturbações serão aplicadas à solução  $S$  da iteração corrente, para geração de uma solução vizinha, o que é análogo a definir o quão distante a solução gerada está do centro do vórtice. O raio, por sua vez, que se utiliza da função *gammaincinv*, irá fornecer um limitante superior para esse número de perturbações, o qual diminui de acordo com a redução do raio.

#### IV. RESULTADOS

Os parâmetros de controle para o VS são o raio inicial  $r_0$  e o fator  $d$ , que irão definir o comportamento decrescente da função *gammaincinv* e a redução do raio a cada iteração. O parâmetro  $Max_{it}$  foi parametrizado ao tamanho do problema, sendo definido como 70% da quantidade de imagens, limitado a 80, caso a instância gere valores acima desse valor. A quantidade de vizinhos  $n$  também é proporcional ao tamanho do problema, neste caso, corresponderá a 70% do número de janelas presentes no horizonte de planejamento limitado a, no máximo, 30 vizinhos.

A metodologia de otimização proposta foi implementada em Python, versão 3.11, sendo o primeiro teste realizado utilizando a instância de teste (I-T) apresentada em [4], que contém 30 imagens, 4 satélites e 2 estações, resultando em 10 janelas de visibilidade, sendo todos os dados de entrada gerados artificialmente para validação da metodologia. Além da I-T, foram consideradas outras quatro instâncias com dados baseados em condições reais de operação.

Para todas as instâncias, considerou-se uma taxa de transferência do satélite entre 300 e 600 Mb/s, sendo atribuídos valores distintos para cada satélite, e que cada imagem possui um volume entre 3 e 5 GB. Também foram atribuídas prioridades entre 1 e 10 e *due-time* distintos, limitados ao horizonte de planejamento e 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 diretamente na alocação das imagens.

Além disso, os parâmetros de controle de cada metodologia de resolução foram calibrados usando o IRACE [15], resultando em:

- VS:  $r_0 = 1,6$ ;  $d = 2,7$
- SA:  $T_{inicial} = 130$ ;  $T_{resf} = 0,99$ ;  $T_{final} = 0,35$

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

A Tabela I apresenta o resultado obtido para I-T, onde a coluna  $M$  representa o método utilizado;  $MS$  a melhor solução encontrada pelo respectivo método;  $NI$  o número de imagens alocadas na melhor solução;  $AM$  o atraso médio, ou seja, considerando o atraso de todas as imagens (em horas);  $MeS$  a média das soluções de cada método;  $DP$  o desvio padrão para esses valores;  $NE$  o número de execuções do respectivo método; e  $TE$  o tempo de execução médio para execução completa de cada método, em segundos.

TABELA I. RESULTADO DAS METODOLOGIAS PARA A INSTÂNCIA I-T

| $M$ | $MS$  | $NI$ | $AM$ | $MeS$ | $DP$ | $NE$ | $TE$ |
|-----|-------|------|------|-------|------|------|------|
| VS  | 59,43 | 12   | 0,41 | 52,04 | 6,82 | 10   | 1,2  |
| SA  | 58,89 | 13   | 2,41 | 52,55 | 4,83 | 10   | 17   |

Os resultados apresentados na Tabela I indicam que os métodos SA e VS obtiveram soluções equivalentes em termos de qualidade da solução (coluna  $MS$ ), mas o SA obteve um desvio padrão um pouco menor (ver coluna  $DP$ ), mostrando uma menor variabilidade. Por outro lado, em relação ao atraso das melhores soluções obtidas, o VS obteve atraso médio de apenas 0,4 horas, substancialmente inferior ao SA. Essa característica supõe que o VS foi capaz de explorar de maneira mais eficiente o espaço de soluções, encontrando arranjos mais promissores quando analisamos o resultado sob esse aspecto da otimização. Além disso, o VS se mostrou mais rápido, quando comparado ao SA, dado que sua execução completa levou em torno de 1 segundo.

Na sequência, foram realizados testes computacionais considerando novas instâncias, para comparar os resultados dos métodos. Para os dados de entrada para estes testes, optou-se por utilizar satélites da constelação ICEYE [16], pois é a constelação contratada pelo Ministério da Defesa para obter imagens de sensoriamento remoto radar para diversas aplicações no contexto nacional. 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 para cada satélite. Essa grandeza foi estipulada por ser considerada suficiente para verificação do desempenho de cada método, ao fornecer uma quantidade de imagens que dificulte a alocação. Para efeito de comparação, para cada instância foi definido um tempo limite de 60 segundos para que cada método fosse executado quantas vezes fosse possível.

No primeiro teste, os dados das janelas foram gerados a partir de um horizonte de planejamento reduzido de 12h para 6 satélites e 2 estações de solo localizadas em território 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 Fig. 2 apresenta o gráfico de convergência

das execuções que obtiveram os melhores resultados do VS e do SA para este teste. No eixo x do gráfico, “Valor de PR” representa a função objetivo da solução obtida em cada iteração das metaheurísticas, qual seja o somatório de prioridades das imagens alocadas na solução.

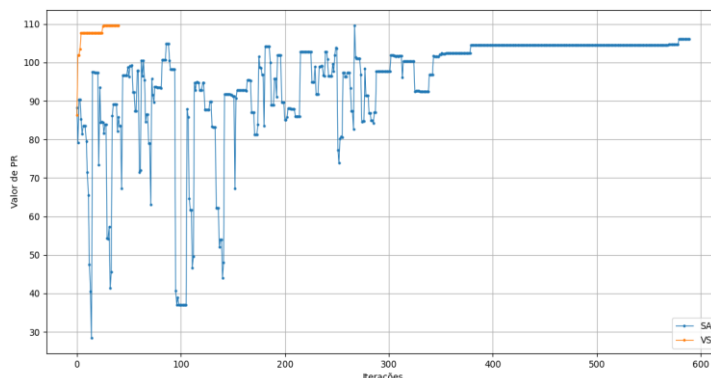


Fig. 2. Gráfico de convergência comparativo entre o VS e o SA.

A Fig. 2 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 VS. Nota-se, ainda, que o VS converge com poucas iterações para a melhor solução, o que ocorre mais tardiamente com o SA. Essa condição resulta, principalmente, da maneira como são exploradas as soluções a cada iteração. Enquanto o VS considera  $n$  soluções e substitui a corrente apenas quando há melhora, o SA explora uma solução por iteração e ainda pode permitir piora, a depender da temperatura vigente.

Novos testes foram realizados variando agora o número de imagens, de estações de solo e de satélites e, consequentemente, 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 II.

TABELA II. 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 III apresenta os resultados obtidos, onde a coluna I representa a Instância e as demais colunas seguem a descrição da Tabela I. Para todas as instâncias, foram disponibilizados 90 segundos para cada método.

TABELA III. RESULTADOS DAS METODOLOGIAS PARA AS NOVAS INSTÂNCIAS

| $I$ | $M$ | $MS$   | $NI$ | $AM$ | $MeS$  | $DP$ | $NE$ |
|-----|-----|--------|------|------|--------|------|------|
| I-1 | VS  | 202,22 | 45   | 0,27 | 201,10 | 0,98 | 7    |
|     | SA  | 196,42 | 45   | 0,48 | 192,47 | 2,79 | 5    |
| I-2 | VS  | 287,85 | 58   | 0,07 | 287,31 | 0,29 | 5    |
|     | SA  | 286,21 | 58   | 0,09 | 284,29 | 3,82 | 5    |
| I-3 | VS  | 324,01 | 61   | 0,08 | 320,26 | 4,69 | 3    |
|     | SA  | 321,59 | 61   | 0,18 | 315,28 | 4,89 | 5    |

Os resultados apresentados na Tabela III indicam que o SA e o VS são praticamente equivalentes em termos da melhor solução e do número de imagens descarregadas, com predominância do VS, principalmente, por sua capacidade de reduzir o atraso médio das imagens. Além disso, o VS prevalece sobre o SA, quando analisamos os valores de *MeS* e *DP*, dado que VS possui valores, respectivamente, superiores e inferiores para as três instâncias. Essa condição permite aferir sua maior robustez, quando comparado ao SA, à medida que consideramos a resolução de instâncias maiores. No entanto, devido à parametrização dos métodos, com o aumento do tamanho das instâncias, as execuções do VS passam a ser computacionalmente mais extensas e, com isto, o SA é capaz de ser executado por mais vezes em I-3.

## V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, o método *Vortex Search* foi aplicado para resolução do problema de planejamento para *download* de dados. Os resultados obtidos foram apresentados e a metodologia proposta mostrou capacidade de explorar com eficiência o espaço de soluções. Em comparação com o *Simulated Annealing*, foi possível observar uma melhoria da solução para algumas das instâncias ou equivalência, com o atributo do *Vortex Search* obter melhores resultados em termos de média na qualidade das soluções e desvio padrão, o que lhe confere maior robustez do ponto de vista prático. Nota-se também que o *Vortex Search* oferece boas soluções em tempo computacional bem inferior para instâncias menores, mas é mais sensível ao escalonarmos o tamanho das instâncias, quando o *Simulated Annealing* se mostra menos impactado por essa condição.

Novos testes computacionais serão realizados para avaliação do método proposto ao considerar horizontes maiores de planejamento, além de um número maior de satélites ou de estações de solo e, consequentemente, de janelas de visibilidade. O tamanho e a quantidade de imagens a serem descarregadas são parâmetros que também poderão fazer parte desta avaliação.

A metodologia utilizada também pode ser alterada para, por exemplo, relaxar a condição de descarregamento completo das imagens, dado que pode ser interessante para o decisor, saber quanto seria possível descarregar das imagens, dentro do horizonte de planejamento, considerando que 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 daquelas imagens.

Além disso, pretende-se avaliar a qualidade das soluções obtidas, quando comparadas à solução ótima, mesmo que para instâncias menores, utilizando o modelo matemático apresentado em [12].

Finalmente, a expectativa é que a metodologia apresentada possa contribuir efetivamente com o projeto PEMSE (Planejamento para Emprego de Sistemas Espaciais), em desenvolvimento do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) que propõe o desenvolvimento de um ambiente de planejamento que, além do problema tratado neste trabalho, busca otimizar também o planejamento para aquisição das

imagens. O intuito é que o resultado deste trabalho seja uma iniciativa inicial para que novas metodologias possam ser desenvolvidas e integradas ao ambiente de planejamento proposto pelo PEMSE e possam apoiar o processo de tomada de decisão no contexto espacial de forma eficiente.

## REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] B. Doğan, T. Ölmez. "A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex Search algorithm". *Information Sciences*, v. 293, p. 125-145, 2015. DOI: 10.1016/j.ins.2014.08.053
- [4] Pola, H.; Pinto, M. J.; Belderrain, M. C. N. "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, 2024
- [5] J. Castaing, "Scheduling Downloads for Multi-Satellite, Multi-Ground Station Missions". In 28<sup>o</sup> Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.
- [6] 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
- [7] D. Karapetyan, S. M. Mitrovic, K. T. Malladi, A. P. Punnen. "Satellite downlink scheduling problem: A case study". *OMEGA - The International Journal of Management Science*, vol. 53, p. 115-123, 2015.
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Z. Chang, A. P. Punnen, Z. Zhou, S. Cheng. "Solving dynamic satellite image data downlink scheduling problem via an adaptive bi-objective optimization algorithm". *Computers & Operations Research*, 160, 106388, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106388>
- [11] M. J. Pinto, H. Pola, M. C. N. Belderrain., A. C. I. Hayashi, E. H. Shiguemori, T. N. Kuck, M. M. De Marchi. "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, 2023.
- [12] M. J. Pinto, H. Pola, M. C. N. Belderrain., A. C. I. Hayashi, T. N. Kuck, E. H. Shiguemori. "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, 2024.
- [13] H. Chen, B. Zhai, J. Wu, C. Du, J. Li. "A Satellite Observation Data Transmission Scheduling Algorithm Oriented to Data Topics". *International Journal of Aerospace Engineering*, p. 1-16, 2020. DOI: 10.1155/2020/2180674
- [14] T. Feo, M. G. C. Resende. "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures". *Journal of Global Optimization*, vol. 6, p. 109-133, 1995. DOI: 10.1007/BF01096763
- [15] M. López-Ibáñez, L. Pérez Cáceres, J. Dubois-Lacoste, T. Stützle, M. Birattari. "The IRACE package: Iterated racing for automatic algorithm configuration". *Operations Research Perspectives*, v. 3, p. 43-58, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2016.09.002>
- [16] ICEYE. ICEYE Product Documentation. Disponível em: <<https://sar.iceye.com>>. Acesso em Maio 2025.