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

ANÁLISE DA MODELAGEM REFERENTE A TRANSFERÊNCIA DE DADOS POR SATÉLITES

Ariany Araújo
Universidade Federal de Viçosa
Rodovia BR 230 KM 7, Rio Paranaíba - MG, 38810-000
ariany.araujo@ufv.br

Ana Julia Sales Braga de Paulo
Universidade Federal de Viçosa
Rodovia BR 230 KM 7, Rio Paranaíba - MG, 38810-000
ana.j.paulo@ufv.br

Helen Vitaline de Castro Santos
Universidade Federal de Viçosa
Rodovia BR 230 KM 7, Rio Paranaíba - MG, 38810-000
helen.castro@ufv.br

Thiago Henrique Nogueira
Universidade Federal de Viçosa
Rodovia BR 230 KM 7, Rio Paranaíba - MG, 38810-000
thiagoh.nogueira@ufv.br

Raiane Ribeiro Machado Gomes
Universidade Federal de Viçosa
Rodovia BR 230 KM 7, Rio Paranaíba - MG, 38810-000
raianemachado@ufv.br

RESUMO

Com os avanços tecnológicos da última década, o uso de satélites tem se ampliado exponencialmente, visto que a tecnologia permite a gradativa redução dos custos dos satélites, bem como amplia as possibilidades de utilização deles. A partir deste cenário, o presente artigo apresenta o problema de escalonamento para aquisição e *download* de dados por satélites e as estações terrestres levando em consideração um horizonte de planejamento. Neste sentido, busca-se encontrar um modelo matemático que otimize este sequenciamento de informações de forma a atender as prioridades e restrições operacionais cabíveis a uma conjuntura factível. Outros trabalhos foram utilizados para direcionar o presente estudo, bem como foram propostas modificações relacionadas ao tipo de modelagem e a função objetivo adotada.

PALAVRAS CHAVE. Aquisição e *download* de dados, Satélites, Modelo Matemático.
OA – Outras aplicações em PO

ABSTRACT

With the technological advances of the last decade, the use of satellites has expanded exponentially, since technology allows the gradual reduction of satellite costs, as well as expanding the possibilities of using them. From this scenario, this article presents the scheduling problem for acquisition and download of data by satellites and ground stations taking into account a planning horizon. In this sense, we seek to find a mathematical model that optimizes this sequencing of information in order to meet the priorities and operational restrictions applicable to a feasible situation. Other works were used to direct the present study, as well as modifications related to the type of modeling and the objective function adopted.

KEYWORDS. Data acquisition and download, Satellites, Mathematical model.
OA - Other OR Applications

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

1. Introdução

Mais de meio século após o lançamento do primeiro satélite artificial pela antiga União Soviética em 1957, Sputnik I, a quantidade de satélites lançados para o espaço cresce exponencialmente, sendo mais de 15 mil satélites projetados para fora da Terra desde então [UNOOSA, 2023; TATEM; GOETZ; HAY, 2008]. Enquanto o contexto dos primeiros satélites lançados pautava-se no uso em pequena escala e com baixa resolução onde um ínfimo grupo de pessoas tinham acesso, atualmente tem-se a aquisição diária de mais de 10 *terabytes* de informação e acessibilidade de um número crescente de pessoas no planeta [TATEM; GOETZ; HAY, 2008]. Fato esse relacionado com a acentuada expansão da tecnologia combinada com a diminuição dos custos de produção de satélites e, também, o grande potencial para aplicações de uso diversos [PINTO et al, 2018].

O uso de informações obtidas pelos sensoriamentos de satélites pode ser aplicado nos mais diversos setores, tanto em casos relacionados ao monitoramento socioambiental e/ou militar, quanto no viés de sistemas de comunicação da 5ª geração (5G), bem como missões inovadoras de banda larga e observações da Terra [KODHELI et al., 2020; KOGAN; POWELL; FEDOROV, 2011]. O monitoramento socioambiental contém diversas possibilidades de aplicações, tais como: derramamento de petróleo nos oceanos, controle de massa de geleiras, prevenção de incêndios florestais, controle da qualidade do ar urbano, monitoramento das áreas costeiras, sensoriamento da agricultura e avaliação da segurança alimentar, entre outros [BROWN, 2015; ENGEL-COX; HOFF; HAYMET, 2004; IPIECA, 2023; HONG; ADLER; HUFFMAN, 2007; KNORR, 2011; NAYAK, 2002; ØSTREM, 1975].

Quanto ao viés militar e de segurança nacional, o sensoriamento por satélites permite o rastreamento das fronteiras marítimas e aéreas dos países, relacionando-se diretamente a segurança e defesa nacional, políticas externas e relações internacionais [HARRIS; BAUMANN, 2021; KODHELI et al., 2020]. Além disso, no viés da comunicação as possibilidades também são vastas, não só as integrações de 5G já mencionadas anteriormente, mas também no que diz respeito à telecomunicação, como por exemplo a radiodifusão e *backhauling*, e integração/convergência de diversos sistemas de tecnologia sem fio [KODHELI et al., 2020]. Isso tudo sem mencionar a primeira aplicação básica de satélites que se vem na cabeça quando pensasse nesse assunto: tecnologia GPS (radionavegação) e as utilizações de satélites para fins meteorológicos [KODHELI et al., 2020; KOGAN; POWELL; FEDOROV, 2011].

Um satélite pode ser definido como um repetidor de micro-ondas na órbita terrestre [NASSIF, 2001]. A comunicação se faz através de sinais transmitidos da estação terrestre até a estação espacial. Os sinais que chegam ao satélite são fracos em função da distância percorrida e precisam ser ampliados por *Low-Noise Amplifiers* (Amplificadores de Baixo Ruído) conhecidos como LNAs. Como explica Lilian Nassif (2001), ao chegar os sinais são alterados à uma nova frequência e então enviados novamente à Terra. Logo, existe o receptor (responsável por receber o sinal), o translador de frequência (responsável por alterar o sinal à sua nova frequência) e o transmissor (que novamente envia o sinal à Terra), e a esse conjunto é dado o nome de transponder.

A otimização das atividades de satélites se faz importante em função de várias facetas do cenário mundial e diversas são as possíveis aplicações e melhorias da Pesquisa Operacional em tal conjuntura [MACAMBIRA, 2021]. Satélites são enviados à órbita com um tempo de vida útil, e ao se tornarem inativos não retornam à estação terrestre, e por serem objetos obsoletos no espaço são considerados lixo espacial, congestionando o espaço em volta da Terra [INPE, 2023]. Buscas por melhoria do tráfego de satélites, melhor aproveitamento do consumo de energia e pela máxima eficiência dos satélites, contribuem para otimizar a vida útil das baterias dos satélites, e beneficiam não só o âmbito tecnológico, como o ambiental.

A partir disso surge a necessidade de estudar o problema de planejamento de aquisição de dados via satélite, bem como o *download* destas informações na estação terrestre. Esse problema foi nomeado como *Data Acquisition and Download Scheduling Satellite Problem* e é utilizada a abreviação DADSSP a fim de simplificar a escrita [PINTO et al., 2018]. Além disso, vale ressaltar que tanto o problema relacionado ao escalonamento de observação/coleta de dados por satélites (a aquisição) quanto o problema do escalonamento de *download* são do tipo NP-*hard*, uma vez que a

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

integração de ambos os aspectos somado às restrições não lineares do problema implica em uma alta complexidade.

2. Referencial Teórico

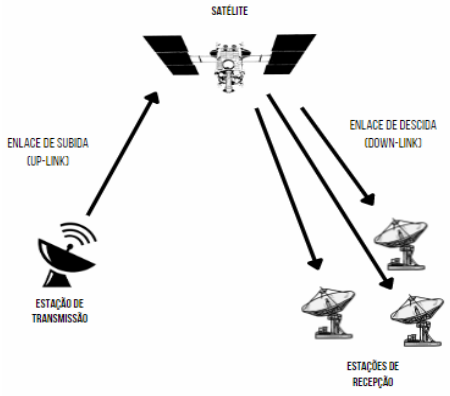
2.1. Estrutura de Comunicação entre Satélite

São possíveis diversos cenários de posição e rota de percurso para um satélite, contudo por convenção foram adotados padrões relacionados a altitude, e a órbita adotada. Se tratando de órbitas, são possíveis as órbitas circulares ou elípticas, como pontuado pelas Leis de Kepler [COSTA, 2015]. À posteriori, classifica-se a altitude da órbita, dentre as circulares tem-se a GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*) que são os satélites com maior altitude, com em média 35.800 km; o MEO (*Medium Earth Orbit*), de altitude considerada média, variando entre 10.000 km e 20.000 km; o LEO (*Low Earth Orbit*), com altitudes menores que 1.500km [PINTO et al., 2018]. Como órbita não-circular tem-se a HEO (Highly Elliptical Orbit) [NASSIF, 2001].

A funcionalidade dos satélites pode empregar diversas aplicações como comunicação, observações terrestres, meteorologia, navegação, pesquisa científica, segurança e fins militares. Dito isso, tem-se observado o movimento de diversas empresas para o aproveitamento das vantagens competitivas do uso de satélites, é o exemplo da Space X do empresário Elon Musk, e da Amazon, que anunciou em 2022 o lançamento de satélites do tipo LEO visando serviços de internet por todo o planeta [CNN, 2022]. Tais estratégias trazem às empresas a vantagem de certo pioneirismo no setor, atrelando o emprego dos satélites aos objetivos organizacionais e gerando a possibilidade de melhorar a efetividade operacional e desenvolver inovações disruptivas no ramo tecnológico se o uso for bem aproveitado.

O emprego de uma constelação de satélites requer uma robusta estrutura de comunicação, Maral e Bousquet (2020) esquematizaram esta a partir dos seguintes segmentos: espacial, composto pelos vários satélites ativos na órbita terrestre; de controle, composto pelas instalações terrestres responsáveis pelo monitoramento dos satélites, também denominadas estações TTC (rastreamento, telemetria e comando), para o gerenciamento do tráfego e recursos dos satélites; e por fim o segmento terrestre, que consiste em todas as estações terrestres de tráfego, compostas por antenas, amplificadores de potência de transmissão (HPA – High Power Amplifier), amplificadores de baixo ruído (LNA – Low Noise Amplifier) e equipamentos de comunicação. E como ilustrado na Figura 1, a comunicação, engloba três principais atribuições: uplinks (transmissão de sinal da Terra para o satélite), downlinks (transmissão de sinal do satélite para a Terra) e os InterSatellite Links (ISLs - transmissão de sinais entre satélites) [MACAMBIRA, 2021].

Figura 1 - Exemplificação da comunicação de satélites



Fonte: Autores.

As grandes distâncias e o congestionamento de objetos na atmosfera atuam como um empecilho tanto para a comunicação intersatelital como para o contato com a base terrestre, além de comprometer a qualidade do sinal e dos dados enviados e adquiridos [PINTO et al., 2018]. Renata Macambira (2021) evidencia uma vasta gama de ferramentas capazes de dar suporte à problemas relacionados a constelações de satélites, com algoritmos e heurísticas que visam otimizar as atividades e consequentemente a funcionalidade do objeto. Tais heurísticas fazem parte

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

do repertório da área de Pesquisa Operacional, com diversos instrumentos que têm em vista a definição de uma solução ótima a partir de um problema modelado formalmente [ZIMMERMAN, 1983].

2.2. O Problema de Programação de Satélites para Aquisição e *Download* de Dados

O Problema de Aquisição de Dados e Agendamento de Downloads de Satélites (DADSSP) foi descrito como um novo modelo por Pinto et al. (2018) como um problema de planejamento de atribuição de solicitações de dados com prioridades distintas à constelação de satélites heterogêneos entre si e, posteriormente, atribuí-los às estações terrestres maximizando o valor dos dados coletados. Além disso, neste contexto é preciso lidar com diversas restrições, sendo elas operacionais, de recursos, incertezas ambientais (climáticas, por exemplo) e temporais [BERGER; LO; BARKAOUI, 2020; PINTO et al., 2018]. No que diz respeito às restrições temporais, Pinto et al. (2018) definiu as janelas temporais como: *revisit time* (intervalo entre observações ininterruptas no mesmo alvo) e *due time* (momento em que o último dado de um mesmo alvo foi recebido na estação terrestre).

No entanto, este é um problema abordado na literatura de variadas formas em que todos visam encontrar soluções ótimas. Contudo, o caminho/algoritmo escolhido para otimizar os resultados difere da metodologia adotada, dentre elas tem-se Programação Dinâmica [AUGENSTEIN et al., 2016; LIU et al., 2019; LIU et al., 2022; PENG et al., 2020], Branch-and-Price [WANG; REINELT, 2011], Branch-and-Bound [BENSANA et al., 1996; CHU et al., 2017; CHU et al., 2017; WANG et al., 2011], Branch-and-Cut [BARD et al., 1998; WANG et al., 2016] e programação linear [AUGENSTEIN et al., 2016; PINTO et al., 2018; PINTO; DE MARCHI, 2019]. Além disso, a temática voltada para a pesquisa também muda com cada referência e é possível notar que a maioria das pesquisas voltadas ao escalonamento de satélites fundamentam-se na programação de imagens e medições por satélites mesmo que as aplicações para tal vão muito além destas (LIU et al., 2019).

Ademais, dentre os trabalhos anteriormente mencionados, poucos tratam em conjunto a aquisição e downloads de dados via satélite conforme estabelecido pelo DADSSP, todavia, uma solução que não aborde a aquisição e *download* de forma integrada tem como possibilidade a sua não aplicabilidade em situações mais complexas em que se utiliza uma quantidade maior de restrições conforme os cenários reais admitem [PINTO; DE MARCHI, 2019]. O conceito do DADSSP foi desenvolvido com o objetivo de maximizar, dado um horizonte de planejamento, o somatório das prioridades em relação aos pedidos de destinação para quais os dados foram coletados e baixados e, pela primeira vez, considerou-se os aspectos relacionados às janelas temporais: *revisit time* e *due time* [PINTO et al., 2018].

No entanto, Wang et al. (2011) apresentou anteriormente uma versão diferente para o modelo DADSSP em que demonstra uma heurística também baseada em prioridades, mas com um contexto de prevenção de conflitos e tomadas de decisão para resolver o problema de escalonamento de uma constelação de satélite de observação da Terra. Este trabalho aborda conceitos também importantes no que tange a operacionalização espacial, como, por exemplo, a flexibilidade do sensor do satélite, isto é, sua capacidade em realizar rotações e inclinações. Contudo, as janelas temporais mencionadas anteriormente não foram abordadas neste modelo. Kim e Chang (2015) também abordam o problema de aquisição e downloads via satélite e, para solucioná-lo, desenvolveram um algoritmo genético. Porém, os autores optaram por trabalhar com um objetivo diferente em que se desejava minimizar o tempo de resposta do sistema definido, isto é, por exemplo, reduzir o tempo entre a solicitação dos dados da imagem e sua distribuição final.

Ainda através das buscas na literatura, encontrou-se o trabalho de Pinto e De Marchi (2019) em que propõe modificações ao trabalho de Pinto et al. (2018) por afirmarem que este modelo pode gerar soluções impraticáveis, visto que não inclui o tempo de transição. O tempo de transição trata-se do tempo necessário para que o satélite mude de um modo de aquisição para outro, tal fato se dá porque os satélites possuem diferentes modelos de aquisição que estão diretamente relacionados a outros fatores, tal como resoluções diferentes das informações coletadas [PINTO; DE MARCHI, 2019].

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

A partir de todas as informações encontradas na revisão da literatura nota-se a existência de diversos modelos para resolução do problema DADSSP ou similares, tanto no que tange às restrições, quanto aos objetivos (operacionais ou de aplicações). Outrossim, é possível perceber a importância de gerar modelos factíveis, no quesito de serem operacionalmente relevantes e que traduzam fielmente as características referentes à órbita e sensores dos satélites, bem como abarque as restrições dos cenários espaciais [PINTO et al., 2018]. Neste contexto, o presente trabalho pauta-se de uma aplicação da programação linear apresentada pelo modelo matemático de Pinto et al. (2018) e aprimorado por Pinto e De Marchi (2019) alinhado com a heurística de programação dinâmica, tal qual Augenstein et al. (2016) aplicaram em seu respectivo trabalho.

3. Procedimentos Metodológicos

3.1 O Problema Matemático da Programação Linear

A fim de compreender o problema matemático proposto por Pinto et al. (2018) apresenta-se a seguir a tabela 3.1.1 que contém os parâmetros adotados para o problema DADSSP, bem como o significado de cada um deles.

Tabela 3.1.1 - Parâmetros utilizados no problema DADSSP

Definição	Parâmetros
Horizonte de planejamento	H
Conjunto de alvos	T
Prioridade do alvo i, i =1,...,T	$pi \geq 0$
Conjunto de satélites heterogêneos da constelação	S
Conjunto de satélites que podem adquirir o alvo	Si
Conjunto de estações de solo	G
Conjunto de estações de solo que podem receber as informações coletadas pelo satélite j	Gj
Conjunto contendo as janelas de visibilidade que o alvo i pode ser adquirido pelo satélite j	Aij
Conjunto contendo as janelas de visibilidade que o dado adquirido pelo satélite j pode ser descarregado para a estação de solo g	Djg
Corresponde ao tempo inicial e final da t-ésima janela de visibilidade para aquisição	[at, a't]
Corresponde ao tempo inicial e final da d-ésima janela de download	[bd, b'd]
Revisit Time do alvo i (RTi ≥0). Observe que, para RTi > 0, o alvo i poderá ser visitado, no máximo ADi vezes dentro do horizonte de planejado H	RTi
Due Time para a k-ésima aquisição do alvo i (DTik ≥0)	DTik
Volume de dados do alvo i (em Mbit)	Vi
Tempo de processamento do satélite j para processar os dados referentes ao alvo (em Mbit/seg)	APj
Tempo de processamento do satélite j para descarregar os dados do satélite para a estação de solo g (em Mbit/seg)	DPjg
Capacidade de tempo de processamento do satélite j durante o horizonte de planejamento H	Cj
Conjunto de satélites que possuem alguma janela de aquisição próxima	S*
Conjunto formado pelos pares de alvos (*i, r*) que possuem janelas de aquisição próximas (T* ∈ T) e que podem ser utilizadas pelo satélite *j* para adquirir alvos *i* e *r*, *i*>*r* (considerando que as janelas para cada satélite estão ordenadas no tempo)	Tj*
Tempo de transição necessário para que o satélite *j* mude de um modo de aquisição para outro.	TTj

Fonte: Adaptado de Pinto et al (2018); Pinto; De March (2019).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

Além disso, Pinto et al. (2018) assume que a aquisição e *download* dos dados vinculam-se em uma relação de dependência com dois fatores importantes: o tamanho do dado (Mij) e o tempo de processamento (Nijg) tanto de aquisição quanto de descarregamento. Dessa forma, o tamanho do dado é a razão do volume de dados de um determinado alvo *i* com o tempo de processamento que um satélite *j* precisa para processar os dados referentes ao alvo *i*. Enquanto o tempo de processamento de aquisição e *download* é a razão do mesmo volume de dados do alvo *i* com o tempo de processamento que o satélite *j* precisa para descarregar os dados do satélite para a estação de solo g. Matematicamente, temos que:

$$M_{ij} = \frac{V_i}{AP_j} \text{ e } N_{ijg} = \frac{V_i}{DP_{jg}}$$

Após apresentadas essas informações é possível demonstrar as variáveis adotadas ao problema, sendo elas apresentadas na tabela 3.1.2.

Tabela 3.1.2 - Variáveis do problema DADSSP

Definição	Parâmetros
A *k*-ésima aquisição do alvo *i* será obtida pelo satélite *j* na janela de visibilidade *t* (*i* ∈ T; *k*=1,…,ADi; *j* ∈ Si; *t* ∈ Aij)	x*ikjt* ∈ {0,1}
A *k*-ésima aquisição do alvo *i* adquirida pelo satélite *j* será descarregada para a estação de solo *g* na janela de visibilidade *d* (*i* ∈ T; *k*=1,…,ADi; *j* ∈ Si; *g* ∈ Gj; *d* ∈ Dig)	y*ikjgd* ∈ {0,1}
O momento inicial da *k*-ésima aquisição do alvo *i* pelo satélite *j* (*i* ∈ T; *k*=1,…,ADi; *j* ∈ Si)	AW*ikj* ≥ 0
O momento inicial da *k*-ésima aquisição do alvo *i* adquirida pelo satélite *j* será descarregada para a estação de solo *g* (*i* ∈ T; *k*=1,…,ADi; *j* ∈ Si; *g* ∈ Gj)	DW*ikj* ≥ 0

Fonte: Adaptado de Pinto et al (2018); Pinto; De March (2019).

Sendo assim, Pinto et al. (2018) e Pinto e De March (2019) definiram como função objetivo do problema a maximização do somatório de prioridades dos alvos (pi) que foram adquiridos e enviados a uma estação solo, sendo matematicamente representada por:

$$Max = \sum_{i \in T} p_i \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} x_{ikjt}$$

Contudo, analisando o cenário desejado, vê-se a interdependência do *download* com a *aquisição* e, quando se maximiza apenas o somatório de prioridades dos alvos adquiridos, não garante que os mesmos tenham sido inteiramente descarregados na estação solo. Portanto, optou-se por modificar essa função objetivo abarcando o *download* como principal variável de decisão, visto que se o dado foi descarregado, ele obrigatoriamente foi obtido anteriormente. Sendo assim, a função objetivo proposta é matematicamente representada por:

$$Max = \sum_{i \in T} p_i \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} y_{ikjt}$$

Além disso, apesar da simples modificação, a função objetivo continua apresentando a mesma série de restrições, estas estão dispostas na tabela 3.1.3 a seguir juntamente com a descrição de cada uma delas.

Tabela 3.1.2 - Variáveis do problema DADSSP

Cod	Restrição	Descrição da Restrição
1	$\sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} x_{ikjt} = \sum_{j \in S_i} y_{ikjgd} \leq 1$, $i \in T, k = 1, \dots, AD_i$	Garantia de completa obtenção de dados quando estes são adquiridos e enviados à estação terrestre, bem como garante que cada alvo será atendido no máximo uma vez (por um satélite e em uma janela de aquisição/download).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

2	$\sum_{j\in S_i}^{\square}\sum_{t\in A_{ij}}^{\square} x_{i,k+1,jt} \le \sum_{j\in S_i}^{\square}\sum_{j\in A_{ij}}^{\square} x_{ikjt}$, $i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1$	Garantia de que, se o alvo *i* é adquirido pela k-ésima vez (x_{ikjt}=1), este algo pode ser adquirido a (k+1)vez ou não ($x_{i,k+1,jt}$=1 ou $x_{i,k+1,jt}$=0). Com isso, há a garantia de uma ordem cronológica de aquisições.
3	$\sum_{t\in A_{ij}}^{\square} a_t\, x_{ikjt} \le AW_{ikj} \le \sum_{t\in A_{ij}}^{\square} (\underline{a_t} - M_{ij})x_{ikjt}$, $i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1, j \in S_i$	Garante que o tempo total de aquisição respeite os respectivos limites das janelas de visibilidade.
4	$\sum_{d\in D_{jg}}^{\square} b_d\, y_{ikjgd} \le DW_{ikjg} \le \sum_{d\in D_{jg}}^{\square} (\underline{b_d} - N_{ijg})y_{ikjgd}$, $i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1, j \in S_i,\ g \in G_j$	Garante que o tempo total de *download* respeite os respectivos limites das janelas de visibilidade.
5	$\sum_{j\in S_i}^{\square} AW_{i,k+1,j} \ge \sum_{j\in S_i}^{\square} AW_{ikj} + RT_i \sum_{j\in S_i}^{\square}\sum_{t\in A_{ij}}^{\square} x_{ikjt}$, $i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1$	Garante que o tempo de revisita (*revisit time* - RT_i) entre as aquisições de cada alvo seja respeitado.
6	$DW_{ikjg} + N_{ijg}\sum_{d\in D_{jg}}^{\square} y_{ikjgd} \le DT_{ik}$, $i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1, j \in S_i,\ g \in G_j$	Garante que os dados adquiridos do alvo serão transferidos para a estação terrestre dentro do prazo solicitado (*due time* - DT_{ik}).
7	$AW_{ikj} + M_{ij}\sum_{t\in A_{ij}}^{\square} x_{ikjt} \le \sum_{g\in G_j}^{\square} DW_{ikjg}$, $i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1, j \in S_i$	Garante que haja precedência entre aquisição e *download*, isto é, os dados de um determinado alvo só poderão ser transferidos para a estação terrestre se, e somente se, já tiverem sido adquiridos anteriormente por aquele satélite.
8	$\sum_{i\in T}^{\square}\sum_{k=1}^{AD_i}\sum_{t\in A_{ij}}^{\square} M_{ij}x_{ikjt} + \sum_{i\in T}^{\square}\sum_{k=1}^{AD_i}\sum_{g\in G_j}^{\square}\sum_{d\in D_{jg}}^{\square} N_{ijg}y_{ikjgd} \le C_j$, $j \in S$	Garante que o tempo total de processamento do satélite não exceda sua capacidade dentro do horizonte de planejamento.
9	$AW_{ikj} \ge AW_{rnj} + M_{ij} + TT_j$, $i, r \in T_j^*, k = 1, \dots, AD_i, n=1, AD_r\ j \in S*$	Garante que o início da próxima aquisição só ocorra após a mudança do modo de operação, caso a mudança seja necessária. (Respeita a variação de modos de aquisição).

Fonte: Adaptado de Pinto et al (2018); Pinto; De March (2019).

3.2. Programação Linear alinhado a Programação Dinâmica em DADSSP

Considerando o caráter do cenário apresentado, é proposta uma metodologia a partir de uma terminologia de grafos para a representação do problema. Em sequência, é selecionado uma heurística alinhando a programação linear e a programação dinâmica, unindo dois métodos presentes na revisão da literatura previamente feita para a otimização da função objetivo definida. Assim, a etapa de construção de uma solução viável para o DADSSP proposto pode ser dividida em duas etapas ou dois subproblemas. A primeira etapa consiste em encontrar subconjuntos de janelas de visibilidade que consigam visitar os alvos necessários respeitando as necessidades de *Revisit Time* e do máximo de visitas AD_i dentro do horizonte de planejamento estabelecido. A segunda etapa visa encontrar o melhor cenário considerando a prioridade de cada alvo para a aquisição do satélite e envio à estação base.

Como apresentado anteriormente, é notória a existência de uma grande quantidade de restrições de densa complexidade. Essa conjuntura implica em aspectos negativos no desempenho do tempo de execução das demandas quando se utiliza apenas programação linear [Augenstein et

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

al., 2016]. Neste sentido, a programação dinâmica é uma maneira de aumentar a performance da execução, uma vez que possibilita a divisão do problema em subproblemas menores que possuem uma relação de interdependência e uma abordagem sequencial [Augenstein et al., 2016]. Em suma, no presente trabalho destrincha o problema DADSSP em dois subproblemas principais: a aquisição de dados de um conjunto de alvo *i* por um determinado satélite *j* (subproblema 1) e o *download* de dados de tal satélite para a estação terrestre (subproblema 2). Destarte, a modelagem do problema pode ser demonstrada através do pseudocódigo a seguir em que se visa resolver o subproblema 1. Posteriormente, o corpo do mesmo pseudocódigo pode ser usado, com suas devidas alterações, para o subproblema 2.

$\sum x_{ikjt} = 0$
for all {i que possa ser adquirido por A_{ij}} **do**
    if (A_{ij} != 0) **then** //verifica-se se existem janelas disponíveis para a aquisição
        a_t = hora atual
        x_{ikjt} = 1
        alvo i é adquirido considerando o tempo de processamento AP_j
        a'_t = hora atual
        $x_{ikjt} = x_{ikjt} + 1$
    end if
end for

Dessa forma, o algoritmo acima será implementado na linguagem de programação Python baseando-se nos mesmos parâmetros apresentados por Pinto e De March (2019) para critérios de comparação. Sendo assim, será considerado um horizonte de planejamento de 3 dias (4320 minutos), três alvos (T1, T2, T3), uma estação terrestre (G), no entanto, utilizaremos apenas um satélite S1 para fins de simplificação, ou seja, neste caso não se trata de uma constelação. Portanto, este satélite possui seis janelas de visibilidade para aquisição (A0 a A5) e três janelas de visibilidade para *download* (D0 a D2). Com isso, a tabela 3.2.1 de Pinto e De March (2019) contém os dados a serem validados a partir da nova abordagem adotada no presente estudo.

Tabela 3.2.1 - Janelas de Visibilidade para Aquisição e Download de dados para cada Satélite.

Aquisição de Dados									
Satélite	Janela	Alvo	Início			Fim			Duração (min)
			Dia	Horário	Min	Dia	Horário	Min	
S1	A1	T2	1	16h45min	1005	1	16h49min	1009	4
	A2	T3	1	16h48min	1009	1	16h52min	1013	4
	A3	T1	2	06h30min	1830	2	06h34min	1834	4
	A4	T2	2	16h55min	2455	2	17h01min	2461	6
	A5	T1	3	06h58min	3298	3	07h02min	3302	4
	A6	T3	3	16h55min	3895	3	17h00min	3900	5
Download de Dados									
S1	D1	G	1	23h57min	1437	2	0h02min	1442	5
	D2	G	3	00h00min	2880	3	00h04min	2884	4
	D3	G	3	23h57min	4317	3	24h00min	4320	3

Fonte: Adaptado de Pinto; De March (2019).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

4. Resultados e Discussões

O modelo matemático foi implementado na linguagem Python através do *software* Visual Studio Code, e as saídas do código estão apresentadas na Tabela 4.1. A coluna Dia de Observação indica em qual dia do Horizonte de Planejamento foi feita a aquisição do alvo, a coluna Dia de Download indica em qual dia do Horizonte de Planejamento foi feito o descarregamento dos dados para a Estação Terrestre. As colunas Janela de Aquisição e Janela de Download indicam quais janelas do conjunto foram usadas para a aquisição e para o descarregamento dos dados.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos

Alvo	Satélite	Dia de Observação	Janela de Aquisição	Dia de Download	Janela de Download
	S1	0 (1º dia)	A0	0 (1º dia)	D0
T1	S1	1 (2º dia)	A1	1 (2º dia)	D1
	S1	2 (3º dia)	A2	2 (3º dia)	D2
T2	S1	2 (3º dia)	A2	2 (3º dia)	D2
T3	S1	2 (3º dia)	A2	2 (3º dia)	D2

Fonte: Os autores.

Foram considerados como dados de entrada os mesmos parâmetros utilizados por Pinto e De Marchi (2019), assim foram definidos: 3 dias de horizonte de planejamento H (H = 3), 3 alvos T1, T2 e T3 (T=3) , 1 satélite (S = 1), 1 estação terrestre (G = 1) e prioridade 1 para todos os alvos (p_i = [1, 1, 1]), além disso, foram consideradas 6 janelas de aquisição e 3 janelas de *download*, e os respectivos valores de *Revisit Time* como RT_i = [1, 3, 2] a partir dos valores de *Revisit Time* foi calculado o número máximo de vezes em que cada alvo poderia ser visitado através da relação $AD_i = \frac{H}{RT_i}$. Outrossim, é possível notar que apenas 3 janelas de aquisição foram utilizadas para observar os alvos escolhidos das 6 janelas de aquisição disponíveis, enquanto todas as janelas de *downloads* foram utilizadas.

Retomando o mencionado nos procedimentos metodológicos, quando o problema foi implementado, percebeu-se que a função objetivo original leva em consideração apenas a aquisição dos dados e não o trajeto completo: aquisição e *download*. Portanto, visando maior assertividade, percebeu-se a necessidade de considerar a função objetivo como, além do somatório de prioridades, o somatório dos *downloads*, visto que quando o *download* é realizado, tem-se que obrigatoriamente uma aquisição foi feita anteriormente. Logo, a função objetivo pode ser representada como:

$$Max = \sum_{i \in T} p_i \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} y_{ikjt}$$

Por fim, comparando com os resultados obtidos por Pinto e De March (2019), é possível notar uma diferença na solução ótima encontrada, visto que no trabalho destes autores, o alvo T3 foi visitado duas vezes, sendo elas nos dias 1 e 3, enquanto na modelagem aqui utilizada, este alvo foi visitado apenas uma vez no dia 3. Ou seja, no modelo adotado não é necessário visitar o alvo T3 para atingir-se o ótimo, uma vez que o *revisit time* indica o intervalo definido entre as visitas e não necessariamente que alvo deve ser visitado na quantidade de vezes indicada pelo *revisit time*. No caso explicitado, foi adotado para o *revisit time* de 2 dias para o alvo T3, ou seja, esse precisa de no mínimo 2 dias de intervalo entre as visitas, o que não implica que o mesmo deva ser visitado duas vezes dentro do horizonte de planejamento de 3 dias.

5. Considerações Finais

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

Pinto et al. (2018) elaborou um modelo matemático para o Problema de Programação de Satélites para a Aquisição e Download de Dados (DADSSP) que posteriormente foi aprimorado por Pinto e De Marchi (2019). A partir destes, o presente trabalho buscou compreender a estrutura desenvolvida anteriormente, esquematizar o problema em um modelo diferente, em que se adotou a combinação da programação linear com a programação dinâmica, bem como avaliar os resultados obtidos. Por conseguinte, os resultados obtidos evidenciaram a necessidade de considerar na função objetivo, os descarregamentos de dados, uma vez que a obtenção dos alvos só se faz completa quando a estação terrestre os recebe ao final do *download*.

Destaca-se ainda que foram considerados apenas um satélite, a título de simplificação da aplicação, bem como apenas três alvos. No entanto, estes números podem ser maiores em cenários reais envolvendo constelações de satélites e uma rede de alvos mais abrangente. Portanto, para futuros estudos, recomenda-se análise do contexto com mais unidades por parâmetro a fim de englobar a complexidade do problema.

Referências

AUGENSTEIN, Sean et al. Optimal scheduling of a constellation of earth-imaging satellites, for maximal data throughput and efficient human management. In: Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2016. p. 345-352.

BARD, Jonathan F. et al. A branch and cut algorithm for the VRP with satellite facilities. IIE transactions, v. 30, n. 9, p. 821-834, 1998.

BENSANA, E. et al. Exact & inexact methods for daily management of earth observation satellite. In: Space Mission Operations and Ground Data Systems-SpaceOps 1996. 1996. p. 507.

BERGER, Jean; LO, Nassirou; BARKAOUI, Mohamed. QUEST–A new quadratic decision model for the multi-satellite scheduling problem. Computers & Operations Research, v. 115, p. 104822, 2020.

BROWN, Molly E. Satellite remote sensing in agriculture and food security assessment. Procedia Environmental Sciences, v. 29, p. 307, 2015.

COSTA, Hélio Santos. As Leis de Kepler sobre a movimentação planetária. 2015.

ENGEL-COX, Jill A.; HOFF, Raymond M.; HAYMET, A. D. J. Recommendations on the use of satellite remote-sensing data for urban air quality. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 54, n. 11, p. 1360-1371, 2004.

HARRIS, Ray; BAUMANN, Ingo. Satellite earth observation and national data regulation. Space Policy, v. 56, p. 101422, 2021.

HONG, Yang; ADLER, Robert; HUFFMAN, George. Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility. Natural hazards, v. 43, p. 245-256, 2007.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Www.inpe.br, 9 Apr. 2023, www.inpe.br/faq/index.php?pai=4

IPIECA. Satellite remote sensing of oil spills at sea. Disponível em: https://www.ipieca.org/resources/satellite-remote-sensing-of-oil-spills-at-sea. Acesso em: 2 abr. 2023.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

KIM, Hongrae; CHANG, Young Keun. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time. Aerospace Science and Technology, v. 40, p. 17-32, 2015.

KODHELI, Oltjon et al. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 23, n. 1, p. 70-109, 2020.

KOGAN, Felix; POWELL, Alfred; FEDOROV, Oleg (Ed.). Use of satellite and in-situ data to improve sustainability. Springer, 2011.

KNORR, Wolfgang et al. Combined use of weather forecasting and satellite remote sensing information for fire risk, fire and fire impact monitoring. Computational Ecology and Software, v. 1, n. 2, p. 112, 2011.

LIU, Zhenbao; FENG, Zuren; REN, Zhigang. Route-reduction-based dynamic programming for large-scale satellite range scheduling problem. Engineering Optimization, v. 51, n. 11, p. 1944-1964, 2019.

LIU, Jinming et al. A data-driven parallel adaptive large neighborhood search algorithm for a large-scale inter-satellite link scheduling problem. Swarm and Evolutionary Computation, v. 74, p. 101124, 2022.

MACAMBIRA, Renata do Nascimento Mota et al. Otimização do consumo de energia em uma rede de satélites de baixa órbita em cenários de alta vazão. 2021.

MARAL, Gérard; BOUSQUET, Michel; SUN, Zhili. Satellite communications systems: systems, techniques and technology. John Wiley & Sons, 2020.
NASSIF, Lilian Noronha. Internet via Satélite: as expectativas da comunicação em banda larga e as implicações tecnológicas. Revista IP, v. 3, p. 2, 2001.

NAYAK, Shailesh. Use of satellite data in coastal mapping. Indian Cartographer, v. 22, n. 147-157, p. 1, 2002.

ØSTREM, Gunnar. ERTS data in glaciology—an effort to monitor glacier mass balance from satellite imagery. Journal of Glaciology, v. 15, n. 73, p. 403-415, 1975.

PINTO, Maria José et al. A new model proposal for integrated satellite constellation scheduling within a planning horizon given operational constraints. In: ICORES. 2018. p. 312-319.

PINTO, M. J.; DE MARCHI, M. M. Análise do Modelo Matemático Referente ao Sequenciamento para Aquisição e Download de Dados por uma Constelação de Satélites. LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Limeira, SP, 2019.

TATEM, Andrew J.; GOETZ, Scott J.; HAY, Simon I. Fifty Years of Earth-observation Satellites: Views from space have led to countless advances on the ground in both scientific knowledge and daily life. American scientist, v. 96, n. 5, p. 390-398, 2008.

UNOOSA. Online Index of Objects Launched into Outer Space. Disponível em: https://www.unoosa.org/. Acesso em: 1 abr. 2023.

WANG, Pei et al. A model, a heuristic and a decision support system to solve the scheduling problem of an earth observing satellite constellation. Computers & Industrial Engineering, v. 61, n. 2, p. 322-335, 2011.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br

WANG, Pei; REINELT, Gerhard. Solving the earth observing satellite constellation scheduling problem by branch-and-price. In: Operations Research Proceedings 2010: Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 491-496.

ZIMMERMAN, H.-J. Using fuzzy sets in operational research. European journal of operational research, v. 13, n. 3, p. 201-216, 1983.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193629
https://proceedings.science/p/193629?lang=pt-br