



Formulação e proposta de uma abordagem para o projeto ótimo de constelação de satélites de coleta de dados

Marcos Vinícius Pistori Venanzi¹, Fabiano Luis de Sousa², Ronan Arraes Jardim Chagas²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Tecnologia Espacial, área de concentração de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Divisão de Sistemas Espaciais – DIDSE.

marcosvenanzi@gmail.com

Resumo. *Este artigo apresenta uma formulação para o projeto ótimo multiobjetivo de constelações de satélites, com aplicação em coleta de dados. É evidenciada a diversidade de aplicações encontrada em revisão bibliográfica para otimização de constelações e em seguida apresentada a formulação do problema para o caso de um sistema espacial de coleta de dados. O problema de otimização é definido matematicamente, apresentada sua representação na forma de estrutura de matriz de projeto estendida (XDSM), bem como o algoritmo de otimização a ser utilizado para a solução do problema.*

Palavras-chave: Otimização; Constelações; Satélite; SCD.

1. Introdução

Uma constelação de satélites de pequeno porte pode ser projetada para operar com centenas de unidades, como por exemplo o caso da constelação de satélite de observação terrestre da empresa Planet Labs, que opera 355 unidades em órbita [Carvalho 2020] ou constelações como da empresa Starlink, que dos milhares de satélites planejados, até junho de 2020 já operam com 538 satélites com massa entre 200 e 300 kg [TechCrunch 2020].

O elevado número de satélites em operação eleva a complexidade do planejamento e análise de missão, o que não é factível de ser abordado por metodologias tradicionais de engenharia de sistemas. É necessária uma integração das disciplinas que compõem o projeto de cada satélite individualmente, além do entendimento da operação dos mesmos quando parte de uma constelação. Devido a essa complexidade, quanto antes for possível avaliar as diversas configurações de órbitas para a constelação, maior será o conhecimento a respeito do sistema e melhor será a definição da solução para uma missão proposta. A



exploração de espaço de projeto é factível através do uso de algoritmos de otimização, e em especial os algoritmos evolutivos, no projeto de constelações de satélites e em estudos preliminares de missão. É disponibilizado em literatura diversos casos abordando o uso de algoritmos de otimização para uma variedade de aplicações. A diversidade de aspectos enfatizados em cada problema também mostra que a definição de uma constelação não é um problema linear e de resolução direta.

Para um caso de satélites de comunicação em cobertura regional de áreas limitadas, conforme avaliado por [Confessore 2001], foi utilizada uma meta-heurística para o projeto de constelações para telecomunicações. Esse algoritmo de otimização, formado por uma etapa liderada por um algoritmo genético seguido por um método de busca local, segue uma estratégia de tentar determinar constelações ótimas de Pareto com relação ao número mínimo de satélites e cobertura regional máxima. Esta abordagem caracterizou-se pelo uso de constelações não-simétricas e busca de ótimo em duas funções objetivo.

Na abordagem utilizada por [Grandchamp 2013], para contornar as complexidades de se usar um algoritmo de otimização, como o tamanho do espaço de projeto a ser explorado, a presença de ótimos locais e o excesso de restrições, foi utilizada uma combinação de método do gradiente e busca Tabu para otimizar a busca por soluções ótimas. Neste exemplo, além dos seis elementos que definem uma órbita (semieixo maior, excentricidade, inclinação, argumento do perigeu, anomalia média e ascensão reta do nodo ascendente), foram utilizadas classes para divisão e organização do tipo de constelação a ser avaliada.

Uma definição de órbita comumente utilizada para se obter menores tempos computacionais é do tipo padrão Walker. Nesta definição, os satélites de uma constelação são espalhados em determinado número de planos orbitais com defasagem entre eles. Outra abordagem utilizada por [Mortari 2011] é o uso de constelações do tipo flor (*Flower Constellation*) para serviços de telecomunicação, avaliando não apenas o desempenho técnico, mas considerando também o fator custo no projeto da constelação.

A comunicação por satélite é efetiva apenas quando satélite é visto pela estação terrena, sendo essa visibilidade afetada pela elevação da linha de visada da estação ao satélite. Barreiras naturais na superfície terrestre podem bloquear a linha de visada quando o satélite estiver em baixas elevações. É mostrado por [Cakaj 2014] a importância da correta configuração da elevação mínima para avaliações e processos de otimização. São apresentados os impactos nos dados de cobertura de uma constelação de satélites em órbita baixa terrestre (LEO) para a elevação de até 10° com altitudes entre 600 km e 1200 km.

Um método de otimização evolutiva foi aplicado na abordagem utilizada por [Meziane-tani 2016] para projeto de constelações de satélite para cobertura regional contínua, sem o uso de comunicação intersatélites. Neste caso, é avaliado o cenário em que é necessário a linha de visada simultânea entre uma estação de envio de dados e uma estação receptora. Um algoritmo do tipo MOGA (*Multi Objective Genetic Algorithm*) foi utilizado para realizar as análises de trade-off para o projeto da constelação considerando o número de satélites, melhora na taxa de cobertura, e redução da altitude dos satélites. É evidenciado que a definição da função de adaptabilidade possui grande influência no projeto final da constelação e demanda uma avaliação por si só. Por fim, é indicado o uso de outros



algoritmos evolutivos multiobjetivos para melhorar os resultados ao invés de análises extensivas dos parâmetros do algoritmo genético.

Na abordagem utilizada por [Singh 2020] para minimização do tempo de revisita global, do 95º percentil do tempo de revisita global, do tempo médio de resposta global, e da necessidade de ΔV para manutenção de órbita durante 3000 dias de órbita propagada, além de técnicas tradicionais de análise de órbita foram implementadas considerações a respeito de ganhos de desempenho do sistema ao utilizar as perturbações orbitais a favor da manutenção de órbita, além de permitir menores taxas de cobertura em longitudes de menor prioridade para um determinado problema. Utilizou-se o algoritmo evolutivo multiobjetivo “Borg” para análise do sistema. É mostrado como o desempenho do sistema é afetado devido a essa mudança de paradigma na definição do problema.

A literatura demonstra que mesmo com auxílio de técnicas de otimização o problema de projeto de constelações possui grande complexidade em sua definição e exploração de soluções. Diversos são os algoritmos possíveis de serem utilizados, as abordagens para formulação do problema e as funções objetivos conflitantes a serem avaliadas.

Um dos campos de aplicação de métodos de otimização para constelação de satélites é o uso de satélites para telecomunicações, em particular sistemas de coleta de dados. O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (SBCDA) teve início em 1993, sendo constituído atualmente pelos satélites SCD-1, SCD-2, CBERS4 e CBERS4A, pelas plataformas de coleta de dados (PCD) distribuídas no território brasileiro, pela Estação de Recepção de Cuiabá e Estação de Recepção de Alcântara e o Centro de Missão Coleta de Dados (CMCD). As informações coletadas pelas PCD são retransmitidas pelos satélites do SBCDA durante o período em que estes possuem linha de visada com a PCD e com uma das estações terrestres de recepção. Os dados obtidos pelo CMCD são distribuídos aos usuários pela internet em até 30 min após sua recepção através do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA).

Apesar da operacionalidade do sistema atual, os satélites do programa SCD já estão muito além da extensão de suas vidas úteis, o que demanda o planejamento de sua substituição para manter a operação do sistema. O atendimento à substituição do SCD-1 e SCD-2 demanda uma análise de missão e estudos preliminares para se obter uma solução sistêmica que satisfaça as partes interessadas do mesmo. Diversas propostas de substituição dos satélites SCD-1 e SCD-2 já foram avaliadas, com órbitas semelhantes às atuais utilizadas por ambos os SCD. Nessas propostas são discutidos os usos de constelações de pequenos satélites para cobertura do território brasileiro. Os satélites de pequeno porte foram avaliados devido a seu baixo custo de ciclo de vida, comparado aos satélites de grande e médio porte, como os SCD. Adicionalmente, como mostra [Yamaguti 2009], além da substituição da operação dos satélites atuais, foi estudada a possibilidade de redução do tempo de revisita do sistema para menos de 16 minutos, o que resultaria em uma operação quase contínua do sistema de coleta de dados.

A necessidade de substituição dos satélites do sistema atual foi ressaltada por [Braz 2013], onde são descritas as necessidades para substituição do sistema atual, bem como os requisitos de eventual sistema a ser implementado. Conforme mostrado, é necessário que sejam realizadas análises de trade-offs para justificar soluções com menor número de



satélites possível para o requisito de tempo de revisita informado, o que pode ser realizado através de algoritmos de otimização, como os descritos neste trabalho.

Sendo assim, propõe-se definir a estrutura de um algoritmo de otimização para o problema de projeto ótimo de constelação de satélites, aplicável ao estudo de caso de um sistema de coleta de dados ambientais.

Este trabalho está sendo desenvolvido no escopo de um mestrado cujo objetivo é desenvolver uma ferramenta para otimização multiobjetivo de constelações de satélites, para utilização em ambiente de engenharia simultânea.

2. Definição do Problema de Otimização

Para um Sistema de Coleta de Dados como o brasileiro, existem centenas de Plataformas de Coleta de Dados espalhadas pelo território nacional. Na Figura 1 são representados os principais elementos do SCBDA: um elemento espacial (como o satélite SCD-1), as estações de recepção de Alcântara e Cuiabá, o Centro de Missão de Coleta de Dados em Natal, e representação das PCD espalhadas pelo território brasileiro. Até 2012 o número de PCDs em funcionamento superava 1000 unidades. [dos Santos 2013]. A Figura 2 exemplifica as órbitas dos elementos espaciais, como o SCD-1, SCD-2, e um satélite da missão CBERS. Apesar das diferentes órbitas utilizadas pelas diferentes missões, o sistema atual não provê tempos de revisita menor do que 1 hora para todas as PCDs do território nacional, conforme mostrado por [Yamaguti 2013]. Para o caso de uma plataforma em Cucui (AM), ocorre 21,82% das revisitas com menos de 1 hora, no entanto para uma plataforma em Quaraí (RS) 100% ocorrem em mais de 1 hora. Demonstra-se assim que para atendimento da necessidade conforme [Braz 2013], o sistema atual é inadequado.



Figura 1. Representação dos Elementos do SCBDA. [Fonte: SINDA]



Figura 2. Representação da órbita dos Satélites SCD-1/2 e CBERS-2. [Fonte: SINDA]

Para um problema de constelação de satélites para coleta de dados, considera-se uma constelação de satélites X formada por um número de satélites n_{sat} , de forma que cada satélite é constituído da seguinte forma:

$$x_k = \begin{bmatrix} h_k \\ e_k \\ i_k \\ \Omega_k \\ \omega_k \\ f_{0,k} \end{bmatrix}, k = 1, \dots, n_{sat}$$

Sujeitos às restrições:

$$\begin{aligned} 1 &\leq n_{sat} \leq 15 \\ 500 \text{ km} &\leq h_k \leq 1000 \text{ km} \\ e_k &= 0 \\ 0^\circ &\leq i_k \leq 100^\circ \\ 0^\circ &\leq \Omega_k < 360^\circ \\ \omega_k &= 0^\circ \\ 0^\circ &\leq f_{0,k} < 360^\circ \end{aligned}$$

Onde h é a altitude do satélite, e é sua excentricidade de órbita, i é a inclinação da órbita, Ω é a ascensão reta do nodo ascendente, ω é o argumento do perigeu e f_0 é a anomalia verdadeira inicial. As restrições também podem ser representadas por seus limites inferiores e superiores, denominados X^L e X^U , respectivamente.

O objetivo do algoritmo a ser elaborado para determinação do projeto ótimo é:



Minimizar

$$F_1, F_2, F_3 (X)$$

Sujeito a

$$F_1 = n_{sat}$$

$$F_2 = t_{gap}$$

$$F_3 = h$$

$$X^L \leq X \leq X^U$$

Onde t_{gap} é o maior intervalo entre transmissões de comunicações consecutivas de uma Plataforma de Coleta de Dados – PCD, considerando todo o conjunto de PCDs de um problema, em um intervalo definido de tempo.

Dado que a substituição dos atuais Satélites de Coleta de Dados 1 e 2 (integrantes do segmento espacial do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais – SBCDA) é um tema de grande interesse e extrema necessidade para o cenário espacial brasileiro, propõe-se utilizar o algoritmo formulado para um estudo de caso de satélites de coleta de dados, utilizando as restrições consideradas em [Braz 2013] para compor as restrições de avaliações de linha de visada a serem executadas pelas funções do algoritmo.

3. Abordagem para Solução do Problema

Com base na formulação do problema e no estudo de caso de um sistema de coleta de dados, foi elaborada uma *eXtended Design Structure Matrix* (XDSM), conforme proposto por [Lambe and Martins 2012], para visualização da otimização multiobjetivo a ser implementada. A XDSM é descrita na Figura 3.

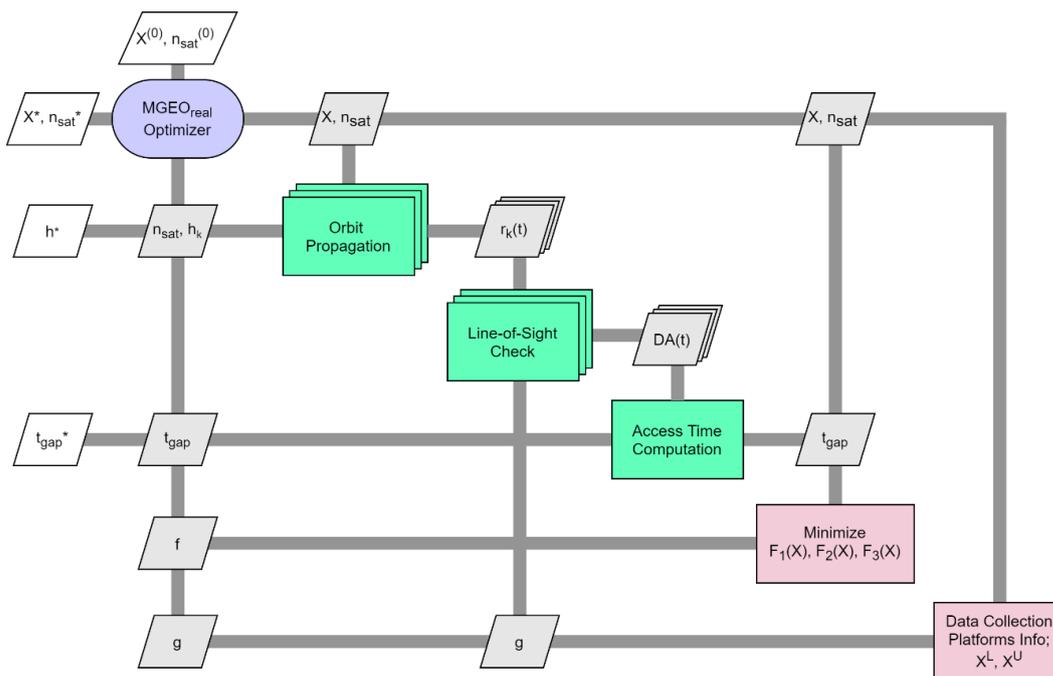


Figura 3. XDSM para projeto ótimo de constelação de satélites.



Com a elaboração da XDSM é possível avaliar as interconexões entre as funções a serem executadas.

3.1 MGEO

O método de Otimização Extrema Generalizada em sua versão Multiobjetivo e com codificação real - MGEO_{real}, será utilizado como otimizador do problema proposto. Este método possui utilizações em estudos conceituais de missões espaciais realizados por [Chagas 2014], bem como análises de erros de apontamento de pequenos satélites conforme [Hott 2019]. O funcionamento da rotina principal do algoritmo MGEO é descrito na Figura 4. A sub-rotina ParetoTest do algoritmo é descrita no fluxograma da Figura 5.

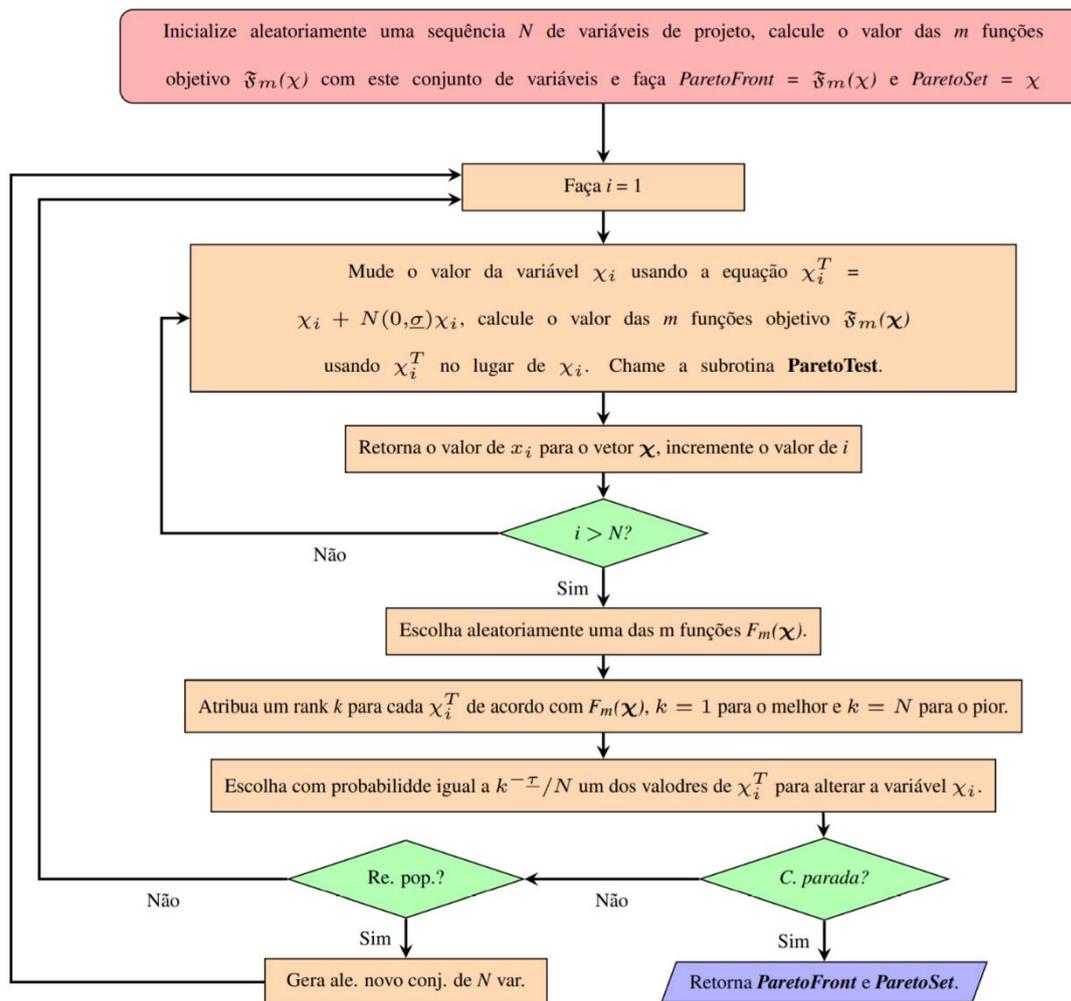


Figura 4. Fluxograma do algoritmo MGEO_{real}. [Fonte: Hott 2019]

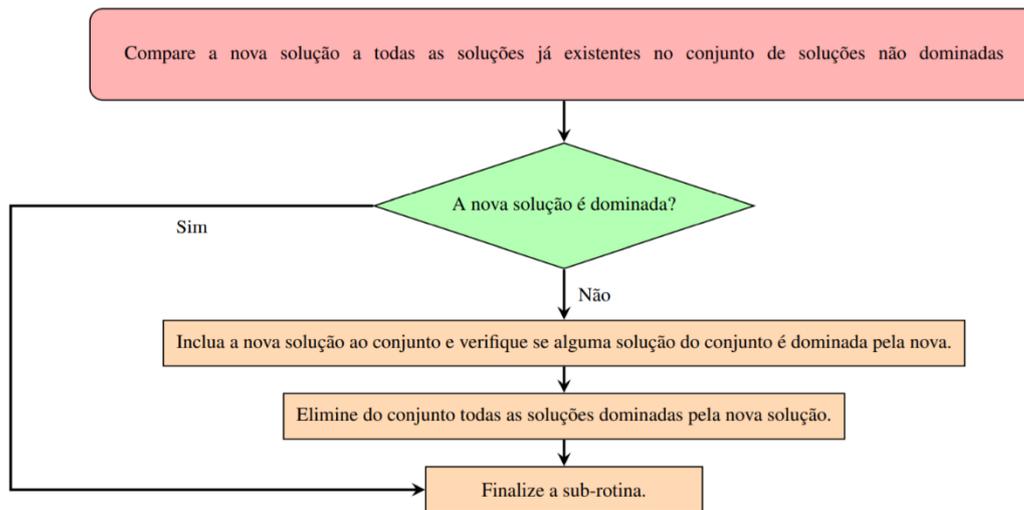


Figura 5. Fluxograma da sub-rotina ParetoTest do algoritmo MGEOréal. [Fonte: Hott 2019]

4. Próximos Passos de Trabalho

O seguimento do trabalho descrito neste artigo contemplará uma revisão da XDSM, aprofundamento das restrições do problema, elaboração e implementação das seções do algoritmo para medida de acesso dos satélites com as PCDs e estações em solo, e, por fim, análise dos resultados obtidos para o caso de interesse (SBCDA).

Será feita implementação em linguagem Julia para facilitar a interface com os algoritmos hoje já implementados no ambiente de análise do CPRIME do INPE.

Referências

- Braz, B. de C., Silva, A. A., Silva, M. M. Q. and Yamaguti, W. (2013). Avaliação e Dimensionamento das Propostas de Continuidade para o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais. In Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. Pages 9078-9085
- Cakaj, S., Kamo, B., Lala, A. and Rakii, A. (2014). The Coverage Analysis for Low Earth Orbiting Satellites at Low Elevation. In International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 5, No. 6, 2014.
- Carvalho, M. J. M. (2010). Estudo De Uma Missão Espacial Para Coleta De Dados Ambientais Baseada Em Nano Satélites, Proposta Edital AEB/MCT/CNPq N° 033/2010, 2010, 21 p.
- Chagas, R. A. J., Galski, R. L., and de Sousa, F. L. (2014). An Orbit Selection Tool for Satellite Constellations Using the Multiobjective Generalized Extremal Optimization (MGE) Algorithm. In *International Systems and Concurrent Engineering for Space Applications Conference*, number 6.
- Confessore, G., Di Gennaro, M., and Ricciardelli, S. (2001). A Genetic Algorithm to Design Satellite Constellations for Regional Coverage. doi 10.1007/978-3-642-56656-1_6.



- Dos Santos, M. A. F., Francisco, M. de F. M. and Yamaguti, W. (2013). O Sistema Nacional de Dados Ambientais e a Coleta de Dados por Satélite. In Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. Pages 9116-9123.
- Grandchamp, E. and Charvillat, V. (2003). Metaheuristics to Design Satellite Constellation. In 4th Metaheuristics International Conference - MIC'2001, Porto, Portugal, 16-20 julho, 2001.
- Hott, G. M. C., Chagas, R. A. J., and de Sousa, F. L. (2019). Estudos preliminares na Otimização de Manobras de Atitude utilizando o Algoritmo MGEO_{real} e o Pacote SatelliteToolbox.jl. In X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil, 7-9 agosto 2019, INPE.
- Lambe, A. B. and Martins, J. R. R. A. (2012). Extensions to the Design Structure Matrix for the Description of Multidisciplinary Design, Analysis, and Optimization Processes. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 46:273–284.
- Meziane-Tani, I., Métris, G., Lion, G., Deschamps, A., Bendimerad, F. T. and Bekhti, M. (2016). Optimization of small satellite constellation design for continuous mutual regional coverage with multi-objective genetic algorithm. In *International Journal of Computational Intelligence Systems*, volume 9, Issue 4, pp 627-637, ISSN 1875-6883, <https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1204112>
- Mortari, D., De Sanctis, M. and Lucente, M. (2011). Design of Flower Constellations for Telecommunication Services. In *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 11, pp. 2008-2019, Nov. 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2158766.
- SINDA – Sistema Integrado de Dados Ambientais. Disponível em: <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/index.php>. Acesso em: 28/06/2020.
- Singh, L. A., Whitticar, W. R., DiPrinzio, M. D. *et al.* (2020). Low cost satellite constellations for nearly continuous global coverage. *Nat Commun* 11, 200 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13865-0>
- TechCrunch (2020). SpaceX launches 58 more Starlink satellites and 3 Planet Skysats for first rideshare launch. Disponível em: <https://techcrunch.com/2020/06/13/spacex-launches-58-more-starlink-satellites-and-3-planet-skysats-for-first-rideshare-launch/>. Acesso em: 26/06/2020.
- Yamaguti, W. and Silva, A. A. (2013). Viabilidade e Alternativas de Configuração de Microsatélites para contribuir na Missão da Agência Nacional de Águas. Disponível em: <http://portal-antigo.aeb.gov.br/viabilidade-e-alternativas-de-configuracao-de-microsatelites-para-contribuir-na-missao-da-agencia-nacional-de-aguas/>. Acesso em 09/07/2020.
- Yamaguti, W., Orlando, V. and Pereira, S. de P. (2009). Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais: status e planos futuros. In Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1633-1640.