

Estudo da variação do total de satélites em constelações Walker Delta para monitoramento da costa litorânea brasileira

Felipe de Castro Silva¹, Willer Gomes dos Santos¹, Liana Gonçalves¹

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

Resumo – Este trabalho apresenta um estudo do impacto da variação do número total de satélites, em constelações do tipo *Walker Delta Pattern*, no tempo de revisita dos satélites para realizar o monitoramento na região da costa litorânea brasileira, conhecida como *Amazônia Azul*. Nesses casos, buscar-se-á manter constante o número de planos orbitais utilizados a fim de se comparar os resultados em termos de diferentes números de satélites no sistema. Para efetuar tal estudo, será feito uso dos softwares STK® e MATLAB®, utilizados em conjunto.

Palavras-Chave – Constelação de satélites, Tempo de revisita, *Amazônia Azul*.

I. INTRODUÇÃO

A costa litorânea brasileira e suas águas jurisdicionais, que prosseguem em direção ao oceano 200 milhas marítimas (370,4 quilômetros), possui em torno de 4,5 milhões de quilômetros quadrados e corresponde a 32% de toda a extensão fronteira do Brasil, constituindo a chamada “*Amazônia Azul*” [1]. Em uma primeira análise dessa região, destaca-se seu grande valor de exploração econômica – com pontos de extração de petróleo, inclusive o pré-sal – como também do ponto de vista dos vastos ecossistemas lá presentes. Ademais, no que tange aos desastres naturais, são poucas tais calamidades que podem ser observadas na costa litorânea brasileira devido ao seu posicionamento geográfico, valendo, no entanto, ser apontados aqueles causados pela elevação do nível do mar em momentos de cheias do oceano [2].

Entretanto, conforme pode ser evidenciado pelo episódio ocorrido em 2019 no derramamento de óleo na costa brasileira [3], existem possibilidades de desastres de causas não naturais que podem causar significativo impacto nas regiões atingidas. Mais além, deve-se citar o recente uso que a fronteira costeira brasileira vem tendo para o crime organizado, em especial o tráfico de drogas e armas, que usa essa região para driblar fiscalizações das forças de segurança do país [4]. A preocupação com tal panorama já é evidenciada nas Forças Armadas com a implementação, por parte da Marinha Brasileira, do Sistema de Defesa SisGAAZ - Sistema de Gerenciamento da *Amazônia Azul* - que teve seu recomeço em 2018 e é, conforme previsto pela Lei nº 12.598/12, estratégico para a defesa nacional, fato corroborado pelo estudo do IPEA [5].

Nesse contexto, várias são as estratégias pensadas para se resolver tal problema [6]. No próprio estudo citado anteriormente pelo IPEA, já se prevê o uso de radares, equipamentos de sensoriamento e, especialmente, o uso de satélites.

De fato, sistemas de satélites vem há muito tempo sendo aplicados em sistemas de monitoramento de regiões de interesse de vários países, inclusive do próprio Brasil, como pode ser exemplificado pelo uso dos mesmo pela Embrapa para utilização na agropecuária brasileira [7].

II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Devido ao tamanho da região a ser estudada, apenas um satélite de monitoramento dificilmente completaria a missão proposta em tempo razoável de revisita da região. Assim, o uso de constelações de pequenos satélites aparece como meio de possibilidade viável de aplicação dessa tecnologia, mantendo-se uma melhor relação custo-benefício de construção, implementação e manutenção se comparado a construção e operação de satélites de pequeno e médio porte, por exemplo.

Busca-se então, neste trabalho, realizar o estudo de revisita de constelações de satélites na região de interesse. Para desenvolver tal atividade, serão utilizados modelamentos de constelação do tipo *Walker Delta Pattern* [8], estudando como o aumento do número dos satélites de uma constelação desse tipo impacta na solução encontrada em termos de tempo de revisita no sistema. Para tal, utilizar-se-ão os softwares STK® e MATLAB® para a realização das simulações necessárias.

III. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Dinâmica Orbital

A dinâmica de um sistema formado por uma constelação de satélites pode ser descrita por diversos modelos dinâmicos, podendo ser usados modelos de dois corpos com ou sem influência de perturbações decorrentes do formato não perfeitamente arredondado da esfera terrestre, que causam efeitos relevantes na dinâmica orbital de determinado veículo espacial.

Vale destacar que nesse trabalho não serão avaliados os efeitos decorrentes da influência de um terceiro corpo no sistema, uma vez que estamos analisando pequenos satélites cujas massas não são suficientes para causar impactos relevantes na dinâmica. Outros corpos celestes como a Lua e o Sol estão suficientemente afastados do conjunto de órbitas a serem usadas (essencialmente órbitas *LEO* – até 1000 km de altitude) para seus efeitos serem desprezados [9].

Nesse contexto, analisa-se o problema com perturbações associadas à não uniformidade da distribuição de massa da Terra, utilizando o potencial gravitacional (por unidade de massa) que nos propicia o cálculo da equação de movimento associada ao problema de dois corpos. Assim, a partir de (1), teremos a relação que associa o potencial gravitacional com a

equação de movimento do corpo, onde o potencial gravitacional ($\phi(r, \varphi)$) é descrito matematicamente por (2) [10].

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\nabla\phi \quad (1)$$

$$\phi(r, \varphi) = -\frac{\mu}{r} \left[1 + \sum_{k=2}^{\infty} J_k \left(\frac{R_e}{r} \right)^k P_k(\sin\varphi) \right] \quad (2)$$

Em (2), μ é a constante gravitacional da Terra, R_e é o raio médio da Terra, r é a distância radial entre o centro da Terra e o veículo espacial, φ o ângulo polar, P_k são termos relacionados ao polinômio de Legendre de ordem k , e, por fim, os termos J_k correspondem aos termos que atendem às perturbações originárias da não esfericidade da Terra. Ainda, a expressão analisada leva em conta apenas efeitos relacionados aos chamados harmônicos zonais, onde estamos desprezando os efeitos dos harmônicos setoriais e tesserais [11].

Quando realizamos um estudo dos valores numéricos entre os valores de J_k , aquele que apresenta maior contribuição é J_2 , sendo algumas ordens de grandeza superior aos demais termos (enquanto $J_2 = 0,00108263$, temos que $J_3 = -0,00000254$, por exemplo [9]).

Dessa forma, o impacto sentido pela contribuição zonal harmônica provocada por J_2 afeta de maneira relevante os elementos orbitais das órbitas, em especial o nodo ascendente, de maneira bastante acentuada. Por exemplo, podem ocorrer variações do nodo ascendente da órbita de satélites de baixa altitude de até $7,7^\circ$ por dia [9], o que impacta consideravelmente no desempenho de uma missão de monitoramento.

Por isso, nesse trabalho, serão considerados efeitos de perturbação apenas referentes ao J_2 no processo de simulação via STK®.

B. Definição da Figura de Mérito

Inicialmente, para se estudar como se dá a cobertura de determinada região, um dos parâmetros mais relevantes no contexto da análise qualitativa da solução de monitoramento é o tempo de revisita sobre a área de interesse.

O tempo de revisita pode ser entendido como o tempo entre duas observações de um ponto no globo terrestre por qualquer um dos satélites da constelação [12]. Vale destacar que as medidas de cobertura e revisita estão intimamente ligadas ao tipo de sensor usado pelos veículos espaciais pertencentes a constelação. No caso deste trabalho, serão considerados sensores do tipo SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

C. Constelação Walker Delta Pattern

Walker Delta Pattern é uma das constelações mais conhecidas entre aquelas propostas por J.G. Walker em seus trabalhos - [8], [13] e [14] - e considera um conjunto de T satélites com S destes igualmente distribuídos em P planos orbitais. Ademais, considera-se que todos os satélites apresentam a mesma inclinação i e apresentam órbitas circulares. A Fig. 1 ilustra uma constelação desse tipo com configuração ($i:T/S/P$) 65:15/5/3. Usualmente, adota-se para

constelações desse tipo a notação ($i:T/P/F$), mas nesse trabalho será utilizada a notação ($i:T/S/P$).

Existe ainda como característica desse tipo de constelação a variável F , o espaço relativo entre planos adjacentes, cujo valor pode variar entre 0 e $P-1$. Dessa maneira, o satélite no plano mais próximo estará a uma distância em graus dada por $F \cdot 360^\circ/T$.



Fig. 1. Constelação 65:15/3/2 do tipo *Walker Delta Pattern*. Fonte: [9].

D. Sensoriamento e Problema de Monitoramento

Do ponto de vista do sensoriamento remoto proposto ao problema de monitoramento, diversos são os tipos de sensores que podem ser usados. Todavia, conforme já dito neste trabalho, serão utilizados sensores do tipo SAR [15].

Sensores do tipo SAR utilizam antenas que captam sinais eletromagnéticos e costumam operar na faixa do micro-ondas, com comprimento de onda variando entre 1 mm a 1 m [16].

Tais sensores apresentam tecnologia que utiliza ondas eletromagnéticas para detectar a presença de objetos e determinar a posição destes, fazendo uso de antenas na obtenção dos dados necessários. Essa tecnologia permite obter imagens com maior resolução espacial, podendo gerar informações mais detalhadas e mais densas [15], ideal para o problema de monitoramento detalhado da costa litorânea brasileira.

IV. METODOLOGIA

A. Uso do software STK® e do MATLAB®

Nesse trabalho, foram integrados ambos os softwares a fim de se realizar as simulações propostas onde se variam o número de satélites total do sistema, mantendo o número de planos constante. Dessa maneira, em todos os casos apresentados variou-se apenas o número de satélites, mantendo-se fixas as demais variáveis que definem uma constelação de satélites *Walker Delta Pattern*.

B. Parâmetros considerados

As datas utilizadas para simulação partem do dia 1 de julho de 2021 indo até o dia 1 de outubro de 2021, ambos iniciando

às 12:00:00 horas, resultando em um total de 3 meses de simulação. Ademais, para as constelações usadas, manteve-se constante a altitude, fixada em 800 km, bem como a inclinação, utilizada a de 25° . Ainda, adotou-se para ascensão reta do nodo ascendente (RAAN) o valor de 45° e para o espaço relativo entre planos F foi utilizado o valor 0 em todos os casos simulados.

Por fim, os gráficos e figuras apresentadas mostram os valores de tempo de revisita considerando a média de toda a região que forma as 200 milhas, ou considerando a divisão em áreas conforme ilustra a Fig. 2, onde a Amazônia Azul foi dividida em 15 regiões diferentes para análise mais compartimentada.



Fig. 2. Divisão da Amazônia Azul em 15 áreas.

C. Parâmetros considerados do sensor

Conforme descrito anteriormente, foram utilizados sensores do tipo SAR iguais em todas as simulações realizadas. Nesses casos, utilizou-se nessas simulações as configurações padrões do STK[®] de *field of view* para sensores desse tipo, onde se utilizam para ângulos de elevação de 10° para o mínimo e 80° para o máximo, bem como para ângulos de exclusão os valores de 35° para frente e 35° para trás.

Quando se trata da qualidade de resolução das imagens obtidas por sensores desse tipo, sabe-se que, devido às limitações que envolvem o tamanho possível da antena do radar que podem ser transportados em satélites e tomando uma frequência específica (portanto com comprimento de onda definido, já que se trata de uma onda eletromagnética), a altitude possível de operação dificilmente consegue ultrapassar algumas centenas de quilômetros [17].

Assim, uma vez que o uso da altitude de 800 km favorece o tempo de revisita, existem preocupações referentes ao nível de resolução que pode ser obtido a essa altitude.

No entanto, como exemplo, o satélite canadense RADARSAT-1 que foi utilizado essencialmente para monitoramento de recursos naturais e do clima global [18], foi lançado em 1995 e operava na faixa de frequência de 5,3 GHz, com altitude de 793 km de perigeu, conseguindo obter imagens com resolução de até 8 metros [17].

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Com base nas características de órbitas já mencionadas, foram realizadas simulações para dois números de planos: $P=2$ e $P=3$, conforme mostram as Fig. 3 e Fig. 4, respectivamente. Dessa forma, para 2 planos foram feitos estudos com número total de satélites variando entre 2 e 14 com passo de 2, e, para 3 planos, estuda-se os casos variando entre 3 e 18, com passo de 3, satélites totais na constelação *Walker Delta*.

Nesse contexto, os resultados apresentados nessas figuras mostram que o aumento do número dos satélites, mantendo-se o número de planos iguais, varia de maneira a diminuir o tempo de revisita médio.

Todavia, percebemos uma tendência exponencial nessa característica. De fato, em ambos os casos ocorre uma diminuição no tempo de revisita com aumento do número de satélites. No entanto, essa diminuição tende a ser cada vez menor conforme se aumenta o número de satélites utilizados. Podemos ver esse comportamento ao compararmos os dois pontos finais das Fig. 3 e Fig. 4 com os dois pontos iniciais desses gráficos.

Ademais, nota-se ainda que os valores apresentados de tempo de revisita são consideravelmente inferiores no caso em que há um maior número de planos, ou seja, para $P=3$. Tal fato pode ser corroborado ao se constatar que no caso em que o número total de satélites é igual a 6, o tempo de revisita para 2 planos ultrapassa as 3 horas, enquanto que para 3 planos temos um valor perto de 50 minutos. Ainda, para 12 satélites, no caso em que $P=2$, novamente teremos tempo de revisita perto de 3 horas, enquanto que para 3 planos temos um valor próximo de 20 minutos. Tal resultado aponta para um maior impacto no número de planos que no número de satélites do sistema de monitoramento formado pela constelação *Walker Delta Pattern*.

As Fig. 5-7 apresentam como variam os tempos de revisita máximo, mínimo e médio para cada área analisada nos casos de número total de satélites 2, 8 e 12, respectivamente, distribuídos em 2 planos. Esses valores mostram que mesmo em cada região analisada separadamente, o comportamento analisado na Fig. 3 se manteve o mesmo, com menor diminuição relativa nos tempos de revisita com aumento dos satélites a partir de certa quantidade de satélites na constelação.

Por fim, a Fig. 8 apresenta como varia a distribuição sob o ponto de vista das regiões especificadas na Fig. 2 do tempo de revisita médio para uma constelação formada por 8 satélites dispostos em 2 planos. Percebemos que, apesar de haver regiões com baixos tempos de revisitas (inferiores a 30 minutos), há também regiões com tempos de revisita muito altos, superiores a 5 horas, o que impacta na média obtida para toda a região analisada. Para uma cobertura dessa região, deve-se buscar obter valores que apresentem menor variação relativa entre o menor e o maior valores obtidos para cada uma das 15 áreas.

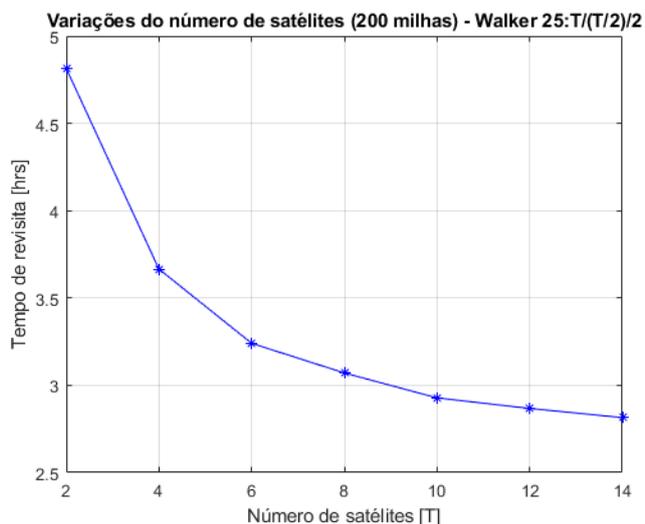


Fig. 3. Tempos de revisita médio na região da Amazônia Azul variando-se o número total de satélites, com 2 planos.

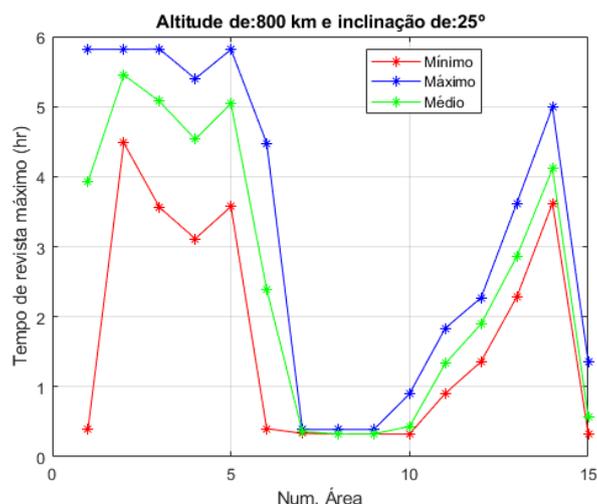


Fig. 6. Tempos de revisita mínimo, máximo e médio por área da Amazônia Azul para uma constelação com T = 8 satélites e P = 2 planos.

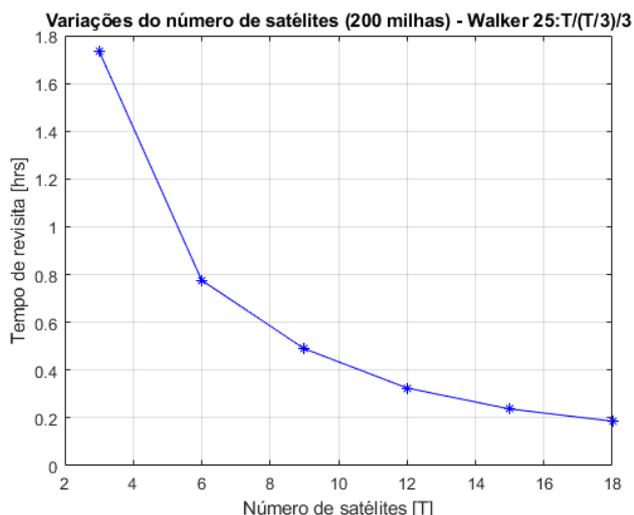


Fig. 4. Tempos de revisita médio na região da Amazônia Azul variando-se o número total de satélites, com 3 planos.

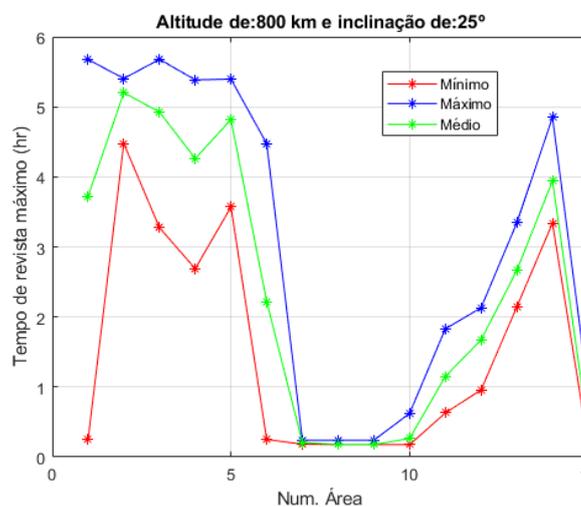


Fig. 7. Tempos de revisita mínimo, máximo e médio por área da Amazônia Azul para uma constelação com T = 12 satélites e P = 2 planos.

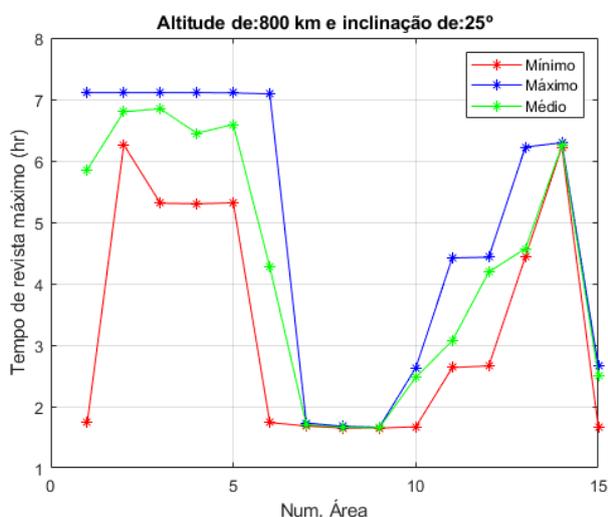


Fig. 5. Tempos de revisita mínimo, máximo e médio por área da Amazônia Azul para uma constelação com T= 2 satélites e P =2 planos.

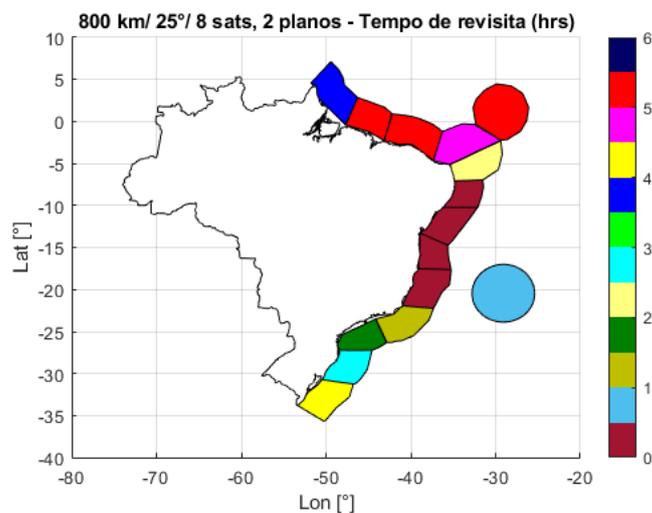


Fig. 8. Mapa por região para tempo de revisita médio, para uma constelação com T = 8 satélites e P = 2 planos.

VI. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, buscou-se avaliar como ocorre o impacto da mudança do número de satélites em uma constelação do tipo *Walker Delta Pattern* de configurações fixas no tempo de revisita desta constelação, com uso de sensores do tipo SAR, ao longo da região conhecida como Amazônia Azul.

Dessa maneira, estudou-se como ocorre a variação do tempo de revisita variando-se o número total de satélites para dois valores de números de planos diferentes. Observamos, portanto, que o aumento do número de satélites impacta na diminuição do tempo de revisita de maneira praticamente exponencial. Ainda, observamos que o tempo de revisita é menor para um maior número de planos, conforme análise desse valor para os casos de 6 e 12 satélites.

Dessa forma, constata-se que, a partir de determinado número de satélites (que depende do número de planos a ser utilizado), ao invés de se aumentar o número total de satélites para se diminuir o tempo de revisita sob a região de interesse, a estratégia mais indicada seria a de aumentar o número de planos, por apresentar diminuições maiores no tempo de revisita do sistema.

Por fim, na escolha da constelação a ser utilizada para uma missão de monitoramento para grandes regiões, deve-se atentar em como varia a revisita em cada sub-região analisada, uma vez que grandes diferenças nos valores por sub-região podem ser observadas.

REFERÊNCIAS

- [1] MMA, “Ministério do Meio Ambiente,” 2019. [Online]. Available: <https://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-aquatica/zona-costeira-e-marinha.html>. [Acesso em 4 Fevereiro 2020].
- [2] CONFAP, “CONFAP Agência de Notícias,” 14 Junho 2017. [Online]. Available: <http://confap.org.br/news/elevacao-do-nivel-dos-mares-aumenta-casos-de-desastres-naturais-na-costa-brasileira/>. [Acesso em 2020 Fevereiro 2020].
- [3] F. Cordeiro, Estadão, 13 Dezembro 2019. [Online]. Available: <https://sustentabilidade.estadao.com.br/noticias/geral,entenda-o-vazamento-de-petroleo-em-praias-do-nordeste,70003026922>. [Acesso em 5 Fevereiro 2020].
- [4] J. O. SUL, “O SUL,” 5 Setembro 2018. [Online]. Available: <https://www.osul.com.br/marinha-vai-combater-traffic-de-drogas-e-armas-pelo-mar/>. [Acesso em 4 Fevereiro 2020].
- [5] IPEA, 26 Março 2019. [Online]. Available: http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=34638. [Acesso em 4 Fevereiro 2020].
- [6] W. G. Santos; et al, “A Study About The Possible Constellations of CubeSats for Brazilian Needs,” *IV IAA Latin American CubeSat Workshop*, Agosto 2020.
- [7] CNPM, EMBRAPA, [Online]. Available: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/>. [Acesso em 4 Maio 2020].
- [8] J. Walker, “Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage,” *Technical Report 70211*, pp. 210-280, Novembro 1970.
- [9] J. R. Wertz, H. F. Meisinger, L. K. Newman e G. N. Smit, *Orbit & Constellation - Design & Management*, 2^o ed., M. P. a. Springer, Ed., Hawthorne, California: Space Technology Library, 2009, p. 980.
- [10] V. A. Chobotov, *Orbital Mechanics*, Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1991.
- [11] P. Sengupta, *Satellite Relative Motion Propagation and Control in the Presence of J2 Perturbations*, Texas, 2003, p. 130.
- [12] A. Bracher e B. Sinnhuber, “An Introduction to Remote Sensing - Chapter 5,” September 2009. [Online]. Available: http://www.iup.uni-bremen.de/~bms/remote_sensing/remote_sensing_chap5.pdf. [Acesso em 29 Maio 2020].
- [13] J. G. Walker, “Some circular orbit patterns providing continuous whole Earth coverage,” *J. British Interplanetary Society*, vol. 24, pp. 369-384, 1971.
- [14] J. G. Walker, “Coverage predictions and selection criteria for satellite constellations,” *Royal Aircraft Establishment*, Dezembro 1982.
- [15] G. O. Lopes e C. A. Lima, “Características e aplicações das imagens SAR na identificação de alvos na Região Amazônica,” *Anais XIV - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 7323-7330, 25-30 Abril 2009.
- [16] W. R. Paradella, J. C. Mura, F. F. Gama, A. R. Santos e G. G. Silva, “Radares Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações,” *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, pp. 2506-2513, 25-29 Abril 2015.
- [17] F. Paul, “Theory of Synthetic Aperture Radar,” University of Zurich - Department of Geography, [Online]. Available: https://www.geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html. [Acesso em 06 Setembro 2020].
- [18] C. S. Agency, “What is RADARSAT-1,” Canadian Space Agency, [Online]. Available: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/what-is-radarsat1.asp>. [Acesso em 6 Setembro 2020].