

Estudo da variação do número total de satélites em constelações Walker para monitoramento da fronteira terrestre brasileira

Mateus 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 de caso da variação do número total de pequenos satélites organizados em uma constelação do tipo Walker. Buscou-se verificar a variação dos tempos de revisita médio, tendo como resultado um comportamento que se assemelha a uma curva exponencial. Dessa forma, quanto maior a quantidade de satélites utilizados, menor é a influência do aumento de artefatos totais no tempo de revisita médio.

Palavras-Chave – Constelação de satélites, Tempo de revisita, Fronteira terrestre do Brasil.

I. INTRODUÇÃO

A fronteira continental (ou terrestre) do território brasileiro possui cerca de 16.886 km de extensão [1], distância equivalente a quase o dobro de Paris à Dubai. Muita desta extensão está localizada em território de floresta ou em regiões inabitadas. São nessas regiões em que se registram algumas das principais rotas de entrada de drogas ilícitas ao território brasileiro [2], fazendo deste um posicionamento estratégico para o combate às drogas pelo governo. Não obstante, as eventuais crises humanitárias em países vizinhos na América do Sul fazem aumentar o número de refugiados e de imigrantes ilegais que se dirigem ao Brasil, aumentando, indubitavelmente, a necessidade de monitoramento desta região [3]. Sendo assim, torna-se latente a identificação e o desenvolvimento dos melhores métodos para a fiscalização da fronteira terrestre brasileira como um todo.

Neste contexto, uma análise do cenário atual brasileiro nos permite identificar a presença de um projeto em andamento para o monitoramento e sensoriamento de fronteiras, chamado de SISFRON (Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras) [4]. Esse programa se baseia em princípios de telecomunicação instantânea, com sistemas em utilização em solo [5], com a necessidade do uso de viaturas militares e antenas instaladas nas regiões de interesse. Deste modo, pode-se perceber que este sistema possui a limitação de haver a necessidade que o local a ser monitorado seja acessível e, contudo, não é essa a realidade de boa parte das zonas a serem estudadas

Neste propósito, surge como abordagem indispensável para esta problemática o uso de satélites e, em particular, o de constelações de satélites que sejam capazes de realizar a cobertura desta região do país de forma eficaz.

II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme mencionado anteriormente, o estudo da fronteira terrestre brasileira é estratégico para o governo brasileiro. Isso se deve ao fato de ser uma região de porta de entrada para as drogas ilícitas no país, além de imigrantes ilegais vindo de países vizinhos que podem estar passando por uma crise humanitária.

Neste sentido, o SISFRON foi criado em 2008 pelo Exército Brasileiro com a finalidade de fortalecer a presença e a capacidade de apoio à decisão e de emprego operacional na faixa da fronteira. Contudo, embora seja notória a importância do SISFRON, a configuração do sistema como está hoje confere a ele limitações que podem afetar os eventuais benefícios previstos no longo prazo [6].

Neste sentido, entendendo-se a importância desta questão para o governo brasileiro, este trabalho busca realizar um estudo sobre como a variação do total de satélites utilizados em constelações de satélites interferem no tempo de revisita médio observado.

III. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Problema de 2 corpos

Para o estudo do comportamento dos satélites que serão utilizados na simulação com o software STK[®], um dos métodos para se determinar as órbitas dos mesmos é o uso do problema de 2 corpos, sendo um deles o satélite e o outro a Terra, conforme apresentado em [7] a partir do uso das Leis de Newton. Deste modo, o modelamento matemático é o mostrado em (1) onde \vec{r} é o vetor distância relativa (entre Terra e satélite) e μ é o valor da constante gravitacional resumida (ou seja, produto da massa do corpo central, *M*, com a constante gravitacional *G*). Ademais, (2) mostra que a aceleração relativa entre os corpos pode ser entendida como sendo o gradiente do potencial.

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3}\vec{r} \tag{1}$$

$$\ddot{\vec{r}} = -\vec{\nabla}\phi \tag{2}$$

Em particular, para as simulações a serem desenvolvidas com o auxílio do STK[®], é considerado o truncamento até J_4 dos harmônicos esféricos. Neste caso, são consideradas apenas as perturbações gravitacionais devido ao geopotencial, as quais apenas os harmônicos zonais causam flutuações, e as de

M. C. Silva, mateussilva32670@gmail.com; W. G. Santos, willer@ita.br; L. Gonçalves, lianadgon@gmail.com.



longo período se forem evitadas as ressonâncias harmônicas estruturais e setoriais [8].

Neste contexto, as perturbações a serem consideradas foram incluídas em (2), conforme apresentado por (3), retirada de [9], na qual o potencial é escrito como função da posição relativa r e da inclinação φ . Além disso, s_{φ} é uma forma simplificada de se escrever sen(φ), enquanto que R_0 é o raio da Terra na linha do equador. Por fim, J_2 representa termos de perturbação de 2^a ordem, assim como J_3 representa a de 3^a ordem e J_4 a de 4^a ordem.

$$\begin{split} \phi(r,\varphi) &= -\frac{\mu}{r} \bigg[1 + \frac{J_2 R_0^2}{3r^2} \left(1 - 3s_{\varphi}^2 \right) \\ &+ \frac{J_3 R_0^3}{2r^3} s_{\varphi} \left(3 - 5s_{\varphi}^2 \right) \\ &+ \frac{J_4 R_0^4}{35r^4} \left(3 - 30s_{\varphi}^2 + 35s_{\varphi}^4 \right) \bigg] \end{split}$$
(3)

Finalmente, o uso das perturbações dos harmônicos esféricos se faz necessária uma vez que elas alteram de forma significante os elementos orbitais em período de tempo relativamente alto. Um exemplo que ilustra essa informação é que a consideração apenas do J_2 pode causar variações do nodo ascendente de 7,7° por dia para satélites de baixa altitude [10].

B. Teoria das constelações

De acordo com [10] uma constelação é um conjunto de satélites distribuídos pelo espaço buscando por meio de trabalho em conjunto, alcançar um objetivo pré-estabelecido. Convém destacar ainda que quando os satélites se encontram em voo próximos um do outro, com troca de dados e com interdependência na lei de controle, tal configuração não condiz com o esperado de constelações, recebendo então o nome de formação em voo.

Neste sentido, o propósito das constelações é o de fornecer cobertura terrestre ou do espaço próximo à Terra. Para um grande número de satélites, como é comum em análises de constelações, a cobertura é um fator fundamental de performance. Contudo, a cobertura terrestre não é, como destaca [10], um parâmetro Gaussiano e muitas vezes dados estatísticos podem levar a resultados enganosos. Deste modo, a cobertura como parâmetro de performance é melhor entendida através de simulações computacionais do problema. O mesmo princípio é observado ao se tratar do tempo de revisita, que consiste no período entre duas passagens de quaisquer dois satélites da constelação sobre um mesmo ponto. Não obstante, embora esses parâmetros apresentem uma influência importante a respeito do desempenho, o número de satélites escolhidos para fazer parte da constelação apresenta uma importante relação com o custo, fazendo com que uma análise de custo-benefício seja necessária para a montagem deste tipo de missão.

C. Constelação Walker Delta

O estudo do padrão de constelações conhecido como Walker se tem início no final da década de 1960, na qual [11] concluíram que para a cobertura global da Terra, era necessário o uso de no mínimo 6 satélites. Contudo, ao incluir uma órbita circular a mais, [12]-[14] mostrou serem necessários apenas 5 satélites para essa missão. A constelação Walker consiste em um conjunto de T satélites, com S destes espaçados igualmente em P planos orbitais [10], sendo a configuração mais simétrica entre as constelações. Costuma-se representa-la por T|S|P, e ainda se considera a variável F, que é o espaço relativo entre os satélites em planos adjacentes como um valor inteiro entre 0 e P - 1.

Por fim, os planos orbitais utilizados são espaçados em intervalos $S * 360^{\circ}/T$, com satélites espaçados na órbita em intervalos de $P * 360^{\circ}/T$. Se um satélite está no nodo ascendente, então o satélite no plano mais próximo estará a $\Delta \varphi = F * 360/T$, grandeza conhecida como diferença de fase.

Na Fig. 1 são apresentadas duas configurações do tipo Walker com inclinação de 65° que exemplificam o modelo apresentado.



Fig. 1. Configuração de constelação *Walker*, ambas com inclinação de 65° e 15 satélites, distribuídos em 3 e 5 planos, respectivamente. Fonte: [10].

D. Sensoriamento

No contexto do sensoriamento remoto no problema proposto, deve-se destacar que o sensor do tipo SAR (*Synthetic Aperture Radar*) foi o escolhido para as simulações com o auxílio do software STK[®].

A tecnologia utilizada parte do princípio da detecção de ondas eletromagnéticas para a obtenção de imagens com maior resolução espacial, sendo este tipo de sensor adequado ao estudo da fronteira terrestre. Essa tecnologia é baseada na utilização de ondas eletromagnéticas para a detecção de objetos (presença e localização dos mesmos) e alguns estudos, como o apresentado em [15], mostram o comportamento dessas ondas utilizadas como base para o sensoriamento remoto com o sensor SAR.

Outrossim, esse tipo de sensor apresenta a utilização de antenas que operam na faixa do comprimento de onda variando entre 1 mm e 1 m, o que representa a faixa do micro-ondas [16]. Contudo, as resoluções espaciais podem variar com a mudança de altitude da órbita dos satélites utilizados para o aclopamento dos sensores.

Buscando exemplificar o uso desse tipo de sensoriamento, temos o Sentinel-1, pertencente a ESA (*Europe Space Agency*), cujo primeiro lançamento foi executado em abril de 2014 com o objetivo de realizar o monitoramento de florestas e áreas agrícolas, além de outras funções como monitorar mudanças climáticas e incêndios. O Sentinel-1 opera com o uso de um sensor SAR com resolução espacial de 5 x 5 metros e está posicionado em uma órbita circular de 693 km de altitude, utilizando a faixa de onda X-band (8-12 Ghz) para o *downlink* de dados para os receptores em solo [17].



IV. METODOLOGIA

A. Uso do software STK[®] e do MATLAB[®]

A fim de se realizar as simulações desejadas, foram desenvolvidas rotinas em MATLAB[®] (da empresa americana MathWorks) de tal forma a automatizar o processo de geração de dados com o auxílio do STK[®] (*Systems Tool Kit*, da empresa também americana AGI). Tal escolha de procedimento está diretamente ligada à boa conectividade que existe entre as duas plataformas consideradas, permitindo que além de se automatizar o processo de simulação, facilita-se o mesmo e gasta-se menos tempo para a realização e criação dos cenários de simulação.

Com isso, foi definida uma constelação padrão e foi alterado a quantidade total de satélites, com todos eles apresentando um mesmo tipo de sensor SAR e seus parâmetros.

B. Parâmetros das constelações simuladas

A fim de se estudar a influência do número total de satélites, é necessário que os demais parâmetros relativos à constelação de Walker sejam mantidos constantes em toda a análise. Neste sentido, uma vez fixado o número de planos a serem considerados, aumenta-se a quantidade de satélites totais com o aumento do número de satélites por plano em uma mesma quantidade.

Não obstante, os valores de altitude e inclinação também devem ser mantidos, bem como o espaçamento interno dos satélites. Por fim, o valor de ascensão reta do nodo ascendente também é mantido constante.

Os dados considerados na simulação são apresentados na Tabela 1. Desta forma, o número de total satélites é variado de 3 em 3, alterando-se sempre 1 satélite por plano orbital.

TABELA I. VALORES DOS PARÂMETROS FIXOS NAS CONSTELAÇÕES

Parâmetro	Valor	
Altitude	800 km	
Inclinação	25°	
Número de planos (P)	3	
Espaçamento relativo (F)	0	
Ascenção reta do nodo	15°	
ascendente	40	

C. Parâmetros considerados do sensor

Considerando como objeto de estudo principal a obtenção dos tempos de revisita médio para a fronteira brasileira, os parâmetros dos sensores do tipo SAR usados em cada satélite foram supostos constantes e iguais aos valores apresentados na Tabela 2. Convém destacar que esses parâmetros são os fatores de entrada para a simulação no STK[®], gerando a representação gráfica mostrada pela Fig. 2. TABELA 2. VALORES DOS PARÂMETROS USADOS PARA O SENSOR SAR.

Ângulos	Valor
Elevação: máximo	10°
Elevação: mínimo	80°
Exclusão: forward	35°
Exclusão: <i>aft</i> .	3.5°

Convém ressaltar ainda que a altitude dos sensores é a mesma dos satélites, já que os mesmos estão conectados entre si.



Fig. 2. Representação do sensor SAR com o auxílio do software STK[®].

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A fim de se realizar o estudo do tempo de revisita da fronteira terrestre brasileira, considerou-se a fronteira legal delimitada como sendo dos limites do país até uma distância de 150 km (conforme a Constituição Brasileira de 1988 [18]), dividindo-a em 12 áreas distintas, referentes aos 11 estados brasileiros que estão na fronteira terrestre do país (com o estado do Amazonas sendo considerado 2 vezes), conforme apresenta a Fig. 3.



Fig. 3. Divisão da fronteira terrestre brasileira em 12 áreas.



Desta forma, considera-se um tempo de simulação de cerca de 1,5 ano, cujas datas e horários de início e término são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3. DATAS E HORÁRIOS DE INÍCIO E TÉRMINO DA	SIMULAÇÃO.
---	------------

Momento	Data	Horário
Inicial	1º de janeiro de 2021	12:00:00
Final	1º de julho de 2022	12.00.00

Neste contexto, são realizadas as simulações no ambiente STK[®] com o uso da plataforma MATLAB[®], alterando-se o número de satélites por plano e, por consequência o número total de satélites. A simulação foi iniciada com 3 satélites em 3 planos orbitais e foi finalizada com 18 satélites distribuídos em 3 planos orbitais, que apresentaram um tempo de revista médio em cada uma das 12 áreas conforme mostrado pela Fig. 4.



Fig. 4. Tempo de revisita médio em cada área da fronteira terrestre brasileira, alterando o número total de satélites.

Os resultados encontrados mostram uma tendência de queda semelhante a uma curva exponencial para o tempo de revisita média em relação ao número total de satélites. Neste contexto, verifica-se que uma alteração de 3 para 6 satélites apresenta uma diminuição relativa do tempo de revisita em torno de 36% a 58%, muito embora essa variação esteja entre 24% e 28% quando a quantidade de satélites totais é alterada de 15 para 18.

Dessa maneira, conclui-se que as variações relativas do tempo de revisita médio no problema de cobertura da fronteira terrestre brasileira são maiores para uma menor quantidade de satélites.

Contudo, as Figs. 5-7 segmentam os resultados encontrados para cada área na qual a fronteira terrestre brasileira foi subdividida.

Percebe-se por uma análise da Fig. 5, que para 3 satélites, a solução apresenta menores tempos de revisita para o oeste da região Norte do país, com destaque para as áreas 1 (no Acre) e 10 (no Amazonas), o que pode estar diretamente relacionado com a inclinação escolhida para o estudo. Verifica-se ainda que a diferença relativa entre o maior e o menor tempo de revisita de cerca de 34%.

Já para 9 satélites, a área 3 (no Mato Grosso) apresenta menores tempos de revisita, enquanto a área 10 (no Amazonas), conforme apresentado pela Fig. 6. Contudo, mesmo com essa área sendo destaque, a variação relativa entre o maior e o menor tempo é de cerca de 12%, o que pode indicar que o número de satélites já tornou a diferença de tempo pouco significativa em um cenário macro da missão espacial.

A fim de conformar tal hipótese, analisa-se a Fig. 7 referente a um total de 18 satélites. Mais uma vez, verifica-se uma diferença relativa de cerca de 12% entre o maior e o menor tempo de revisita, observados nas áreas 5 (no Paraná) e 3 (no Mato Grosso) respectivamente. É interessante perceber que o percentual de 12% do tempo de revisita em questão representa cerca de 1,44 minuto, que é um tempo baixo em relação ao movimento orbital completo dos satélites.



Fig. 5. Tempos de revisita médio por área da fronteira, considerando T = 3 satélites.



Fig. 6. Tempos de revisita médio por área da fronteira, considerando T = 9 satélites.

Sendo assim, após uma escolha de um número de satélites suficientemente grande, a variação relativa do tempo de revisita entre as áreas da fronteira passa a não ser mais alterada significativamente. Deste modo, se for desejado alterar a área da fronteira que se deseja um menor tempo de revisita, devese buscar alterar os demais parâmetros da constelação utilizada.





Fig. 7. Tempos de revisita médio por área da fronteira, considerando T = 18 satélites.

Além disso, os tempos de revisita também tendem a se tornar cada vez mais próximos de um valor médio, diminuindo-se o desvio padrão do mesmo. A fim de se ilustrar tal efeito, é apresentada a Fig. 8, na qual um mapa de cores da fronteira é destacado para o uso de 9 satélites, exemplificando essa tendência de valores muito próximos de tempo de revisita médio.



Fig. 8. Representação gráfica da variação do tempo de revisita médio na fronteira terrestre brasileira para um total de 9 satélites na constelação Walker.

VI. OBSERVAÇÕES FINAIS

A partir dos dados apresentados, verifica-se uma variação com um formato de curva de tempo de revisita médio pelo número total de satélites que se assemelha a uma exponencial. Tal resultado nos permite verificar que quanto maior o número de satélites já presentes na constelação, menos efeito em termos de diminuição em tempo de revisita médio terá o acréscimo de outros satélites.

Não obstante, em termos das diversas áreas da fronteira (que em média representam diferentes estados do país), um aumento da quantidade de satélites contribui para uma maior uniformidade dos tempos de revisita, fazendo com que a área com maior e a área com o menor tempo apresentem variações relativas em torno de 12%, que é um valor relativamente baixo em relação ao movimento orbital dos satélites considerados.

REFERÊNCIAS

- Escritório de Projetos do Exército EPEx (s.d). SISFRON e seus subsistemas. Acesso em 07 de 09 de 2020, disponível em: http://www.epex.eb.mil.br/images/pdf/FOLDER-SISFRON.pdf.
- [2] Exército Brasileiro (13 de março de 2018). Tráfico de pessoas, armas e drogas e crimes ambientais são reprimidos com ações na fronteira oeste do país. Acesso em 07 de setembro de 2020, disponível em https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito/-/asset_publisher/MjaG93KcunQI/content/trafico-de-pessoas-armas-edrogas-e-crimes-ambientais-sao-reprimidos-com-acoes-na-fronteiraoeste-do-pais-.
- [3] Exército Brasileiro (27 de janeiro de 2020). Operação de apoio humanitário aos refugiados afetados por crise social na Venezuela tem novo comandante. Acesso em 07/08/2020, disponível em: https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito/-/asset_publisher/MjaG93KcunQI/content/id/10985644.
- [4] Landim, H. (2013). SISFRON: Ferramenta de ampliação da Diplomacia Militar brasileira e fortalecimento do CDS. *Política Hoje*, 24(1).
- [5] Peres, Thiago F. de B. (2018). As comunicações no 3º pelotão especial de fronteira (PEF) – Vila Bittencourt por meio do Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras (SISFRON): Uma proposta futura no controle de ilícitos transfronteiriços na Amazônia. Acesso em 07/09/2020, disponível em https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/2694/1/Tcc_Com_Ca p_ThiagoFerraz.pdf.
- [6] Andrade, I. O., Cortinhas, J. S., Soares, M. A., & Franco, L. G. (2019). Sistema Integrado de Monitoramento. IPEA, Rio de Janeito.
- [7] Curtis, H. (2010). Orbital Mechanics for Engineering Students. Waltham, USA: Elsevier LTD.
- [8] Hough, M. (1980). Orbits near critical inclination, including lunisolar pertubations. *The Analytic Sciences Corporation*
- [9] Petty, C., & Breakwell, J. (1960). Satellite orbits about a planet with rotacional symmetry. *Journal of The Franklin Institute*, 270(4).
- [10] Wertz, J. (2001). Orbit & Constellation; Design & Management. New York: Springer.
- [11] Easton, R., & Brescia, R. (1969). Continuously visible satellite constellations. NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC.
- [12] Walker, J. (Novembro de 1970). Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage. *Royal Aircraft Establishment Technical Report*(70211).
- [13] Walker, J. G. (1977). Continuous whole-earth coverage by circular-orbit satellite patterns. *Royal Aircraft Establishment Farnborough (United Kingdom)*.
- [14] Walker, R., Christy, J., & Harrington, R. (1978). Positions of planets and natural satellites. *The Astronomical Journal*.
- [15] Franceschetti, G., & Perna, S. (2006). SAR Sensor Trajectory Deviations: Fourier Domain Formulation and Extended Scene Simulation of Raw Signal. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE* AND REMOTE SENSING, 44(9).
- [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] ESA European Space Agency (s.d). ESA Operational Missions Sentinel-1. Acesso em 07/08/2020. Disponível em: https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eomissions/sentinel-1.
- [18] Rocha, C. (2016). Base normativa e proposições legislativas sobre fronteiras no Brasil. Consultoria Legislativa, Câmara dos Deputados. Acesso em 17 de julho de 2020.