



Aplicação do Critério da Menor Perda para Otimização de Constelações de Satélites

Rogério Rodrigues F. Pereira¹, Evandro Marconi Rocco²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Doutorado do curso de Mecânica Espacial e Controle.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
professor do Curso de Mecânica Espacial e Controle

zeropereira@gmail.com

Resumo. Constelações de satélites podem ter um número grande de configurações possíveis dependendo de seu objetivo, equipamentos à disposição, número de satélites, instrumentos embarcados, capacidade de lançamento e outras condições. Essas variáveis combinadas têm custos associados como financeiros, de tempo, pessoal e infra estrutura. A tentativa de reduzir tais custos ao mesmo tempo em que a tarefa seja cumprida satisfatoriamente é um problema clássico de otimização. Neste trabalho é aplicado o Critério da Menor Perda para selecionar a melhor alternativa considerando objetivos concorrentes a partir de um conjunto de constelações que fornecem cobertura contínua para uma região específica.

Palavras-chave: Critério da Menor Perda; Constelações de Satélites; Otimização Multiobjetivo.

1. Introdução

Constelações de satélites têm vantagens quanto à cobertura quando comparadas aquelas provenientes de um único instrumento. Por exemplo, podem oferecer cobertura da superfície do planeta por meio de satélites em órbitas próximas da Terra, possibilitando maior resolução para o imageamento em comparação ao uso de satélites em órbita geostacionária. Além disso, a comunicação com satélites em órbita baixa apresenta menor atraso de sinal e os equipamentos necessários para comunicação necessitam de menos potência para sua operação (MATOSSIAN, 1997).

No entanto, a adoção de constelações implica em um aumento da complexidade. Órbitas que não permanecem geostacionárias podem exibir lacunas de cobertura e contornar esse problema não é uma tarefa simples. Uma série de novos elementos deve ser considerada, como o número e altitudes dos satélites disponíveis, o tipo de órbita utilizada, o espaçamento entre os satélites em um plano orbital, bem como sua eventual distribuição por diferentes planos orbitais. A distribuição dos satélites por diferentes planos e sua manutenção nas órbitas aumenta o custo operacional.



Desde a década de 60 estudam-se diferentes configurações para as constelações de satélites. Desde problemas de cobertura simples (GOBETZ, 1963) até aquelas em que é necessário mais de um satélite visível em cada região a cada instante (EASTON; BRESCIA, 1969). As arquiteturas do tipo rosetta, desenvolvida inicialmente, e de forma independente, por Walker (WALKER, 1970) e Mozhaev (MOZHAEV, 1973) contando posteriormente com a contribuição de Ballard (BALLARD, 1980) para a avaliação e design das constelações, são eficientes para coberturas de grandes áreas (MATOSSIAN, 1997). No entanto, outras soluções para cobertura regional podem ser consideradas, ampliando o conjunto de possibilidades para os projetistas.

Atualmente, pequenos satélites tornaram-se um ativo crucial na indústria espacial. Muitas empresas estão agora substituindo grandes aparelhos por satélites pequenos e comercialmente disponíveis aumentando a velocidade de desenvolvimento e a implantação por uma fração do custo. De fato, grandes constelações de pequenos satélites já estão sendo usadas para fornecer imagens diárias e permitir novas abordagens para a agricultura, inteligência empresarial e ciências da terra (KOPACZ, 2020).

No domínio das comunicações, constelações contínuas de cobertura global foram propostas pela OneWeb, Telesat, SpaceX e até facebook; no entanto, em alguns desses casos as composições da constelação variam amplamente entre 300 e 3000 satélites. Essa tecnologia conectará nosso mundo de maneiras inimagináveis, mas a comunidade está carente de ferramentas fundamentais para otimizar estratégias de implantação e configurações de constelações (BRODKIN, 2017).

Além do problema da configuração em si, resta ainda encontrar a melhor solução para cada situação. Se apenas considerarmos órbitas simétricas, circulares e polares, deixaremos um conjunto enorme de soluções candidatas para desempenhar a função necessária em cada missão. Soma-se a isso a possibilidade de elaborar outras configurações com órbitas excêntricas ou ainda a combinação entre os dois modos. Tais configurações diferem em número de satélites, planos orbitais e altitudes e, na maioria dos casos, são encontradas soluções concorrentes. Sendo este o caso existem diversos métodos de otimização e seleção para a escolha da configuração adequada, entre eles o método de Pareto (PARETO, 1984) e o Critério da Menor Perda (ROCCO, 2002). Estes dois serão utilizados para avaliar um conjunto de constelações a fim de determinar a solução ótima a partir do pequeno conjunto de constelações que serão aqui apresentadas.

2. O Problema Multiobjetivo

Problemas multiobjetivo são recorrentes em várias áreas do conhecimento. Frequentemente lidamos com situações no dia a dia em que várias soluções são apresentadas como razoáveis e devemos optar por uma dentre um conjunto possível. Problemas de custo-objetividade são um bom exemplo de problemas multiobjetivo. Em outras palavras, quando uma solução não é claramente dominante deve-se recorrer a algum método de escolha para dar sequência no projeto.

Em problemas multiobjetivos, em geral, não é possível comparar todas as soluções possíveis pois a comparação com base em um objetivo pode ser avaliada de maneira contraditória ao mudar a base de comparação entre os objetivos. Dessa forma, em um problema de maximização,



supondo que:

$$\mathbf{Z}(x_1) = [Z_1(x_1), Z_2(x_1)]; \quad \mathbf{Z}(x_2) = [Z_1(x_2), Z_2(x_2)] \quad (1)$$

x_1 é mais adequado que x_2 se e somente se:

$$Z_1(x_1) > Z_1(x_2) \quad \text{e} \quad Z_2(x_1) \geq Z_2(x_2) \quad (2)$$

ou

$$Z_1(x_1) \geq Z_1(x_2) \quad \text{e} \quad Z_2(x_1) > Z_2(x_2) \quad (3)$$

Se $Z_1(x_1) > Z_1(x_2)$ e $Z_2(x_1) < Z_2(x_2)$ não pode-se concluir nada em relação a x_1 e x_2 , ou seja, x_1 e x_2 não podem ser comparados (ROCCO, 2002).

2.1. O Método de Pareto

Uma das maneiras de lidar com o problema da otimização multiobjetivo é por meio da obtenção do conjunto de soluções não dominadas a partir de um conjunto maior de candidatas à solução do problema multiobjetivo. Supondo que todos os i objetivos de um vetor de objetivos Z_b devam ser minimizados, uma solução, representada por um vetor m -dimensional $x_b \in R_m$, é dita não dominante sobre outra solução $y_b \in R_m$, se para qualquer i , $Z_i(y_b) \geq Z_i(x_b)$. O conjunto de soluções que não são dominadas por qualquer outra solução em todo o espaço disponível é a fronteira de Pareto, e tais soluções, segundo Pareto, apresentam o mesmo grau de otimalidade, já que não é possível melhorar um dos objetivos sem piorar os outros (PARETO, 1984).

2.2. O Critério da Menor Perda

Embora o método de Pareto ofereça um conjunto de soluções não dominadas e, portanto, de mesmo grau de otimalidade, ele não fornece uma solução única para o problema. Seria vantajoso, principalmente para aplicações em engenharia, utilizar uma metodologia que fornecesse uma única solução para o problema de otimização multiobjetivo e que levasse em conta todos os objetivos simultaneamente e igualmente. Ao obtermos um conjunto de soluções sobre a fronteira, como resultado do método de Pareto, voltamos, de certa forma, ao início do problema. Para escolher uma solução sobre a fronteira teríamos que fazer escolhas que poderiam favorecer um objetivo em detrimento de outros, geralmente a partir de pontos de vista subjetivos. Seja por parte de quem está avaliando, seja por parte de quem elaborasse quais prioridades seriam consideradas. O Critério da Menor Perda propõe-se a oferecer uma solução objetiva para o problema multiobjetivo. Nesses problemas, soluções extremas não devem ser consideradas como ótimas. Somente uma solução intermediária pode levar em consideração a simetria entre as soluções candidatas. A possibilidade de encontrar tal solução é dada pelo seguinte critério (ROCCO, 2002; ROCCO; PRADO et al., 2013).

Uma tentativa é encontrar o baricentro do polígono cujos lados representam os diferentes objetivos em um problema m -dimensional. Como exemplo, tomemos um problema que consiste de 3 objetivos conflitantes, conforme a figura 1. S_1 , S_2 e S_3 representam as soluções ótimas para cada um dos objetivos, consideradas separadamente. B é o baricentro do triângulo



formado por $\overline{S1S2}$, $\overline{S2S3}$ e $\overline{S3S1}$. Pela definição de baricentro a distância entre B e os vértices representados pelas soluções $S1$, $S2$ e $S3$ é a mesma. Nesse caso, se o baricentro B é adotado como solução para o problema multiobjetivo o segmento $\overline{S1B}$ representa a perda em relação ao objetivo 1 e assim por diante até o objetivo 3. Então, a partir da figura 1 concluímos que, se os objetivos são considerados de forma equivalente, a melhor solução coincide com o baricentro do triângulo.

De uma forma geral, podemos imaginar qualquer polígono regular inscrito dentro de uma circunferência de raio r , de forma que a distância entre seu baricentro e seus vértices seja igual a r e estes representem as soluções ótimas, normalizadas, para cada um dos objetivos conforme exposto na figura 2. Ao procedermos dessa maneira, caso estejamos procurando minimizar os objetivos, a solução será aquela cujo polígono tiver a menor área.

3. Método

Vamos abordar o problema determinando uma área a ser coberta. A Alemanha será tomada como exemplo. Para delimitar a área de cobertura são utilizadas as coordenadas de latitudes e longitudes, gerando um polígono que envolve todo o território. Esse polígono é construído usando uma geometria computacional, no caso específico, o software *systems toolkit* (STK) desenvolvido pela *Analytical Graphics, Inc.* (AGI). Por sua vez, a área total desse polígono é dividida em uma série de pontos a fim de calibrar-se a resolução desejada. Quando maior a resolução, maior o custo computacional.

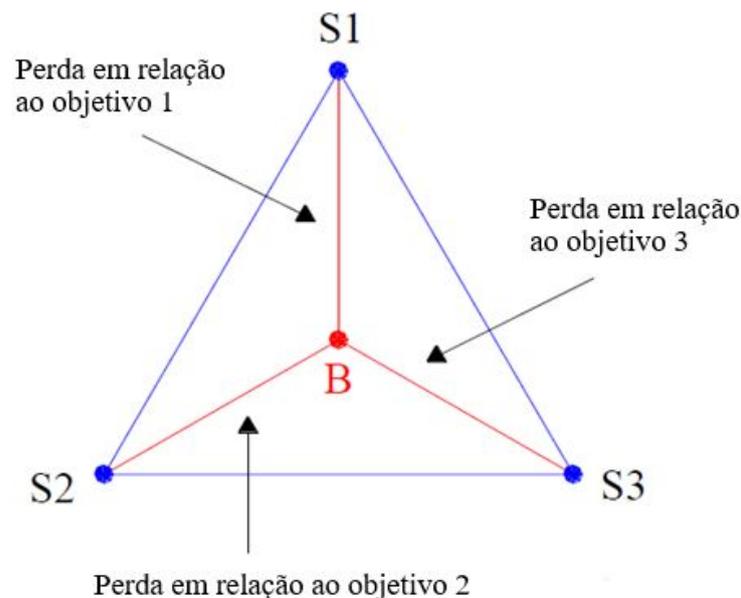


Figura 1. O Critério da Menor Perda (ROCCO, 2002).



Uma vez definida a região, associa-se a ela uma estação de rastreamento responsável por avaliar quando os satélites estabelecem contato, aqui denominado *Facility1*, cuja função é capturar os dados de cada sensor dos satélites designados a fazer a cobertura, conforme a figura 3:

A próxima etapa é definir um conjunto de constelações que ofereçam cobertura dessa região por um período determinado. No exemplo, dois dias. O design dessas constelações segue alguns critérios básicos e, como ilustração, não serão consideradas aquelas geossíncronas nem geoestacionárias. O design das órbitas consiste dos elementos orbitais: semi-eixo maior a , excentricidade e , inclinação i , longitude do nodo ascendente Ω , argumento do perigeu ω e anomalia média M .

O ângulo máximo centrado na Terra θ e a faixa máxima de cobertura ocorrem quando o satélite está em seu apogeu $r_a = a(1 + e)$. A pegada do satélite (Figura 4), ou seja, a área que ele se comunica com o solo ou uma determinada estação de captura de dados, com ângulo de elevação ϵ define o círculo de cobertura com raio θ através da equação:

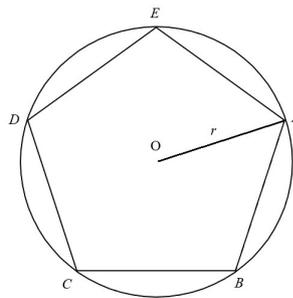


Figura 2. Polígono inscrito na circunferência de centro O e raio r cujos vértices $ABCDE$ representam as soluções maximizadas, normalizadas.



Figura 3. Estação de rastreamento, aqui denominada *Facility1*, associada à região delimitada pelo polígono a fim de registrar os dados de cobertura dos satélites



$$\theta_{max} = -\alpha + a \sin \left(\frac{a(1+e)}{R_e} \sin(\alpha) \right). \quad (4)$$

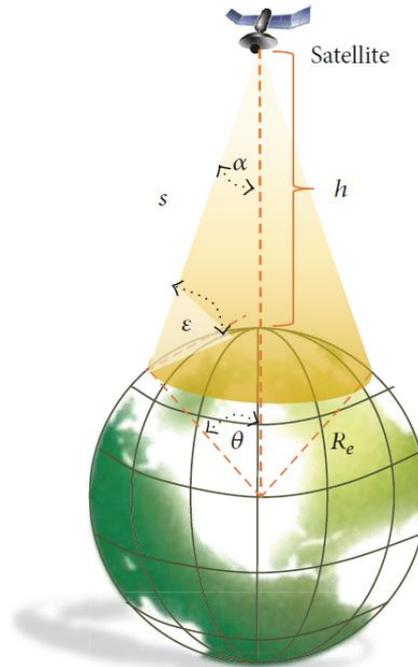


Figura 4. Pegada do satélite

É possível considerar um conjunto enorme de constelações com diversas técnicas diferentes, desde as analíticas supracitadas como aquelas que envolvem algoritmos genéticos (HITOMI; SELVA, 2018), ou outras que combinam estes com métodos semianalíticos (SAVITRI et al., 2017). Como a ideia aqui é apenas usar um pequeno conjunto para ilustrar os critérios de seleção para um problema multiobjetivo, soluções analíticas e conhecidas serão utilizadas.

No problema consideremos a região formada pela Alemanha, conforme discutido anteriormente. A missão é configurar constelações que ofereçam cobertura contínua por um período de 48 horas. Há 3 parâmetros a serem considerados:

- A altitude h .
- O número de planos orbitais P .
- O número de satélites T .

Esses são 3 objetivos conflitantes: Quanto menor a altitude da constelação, maior será o número de satélites, e eventualmente, o número de planos orbitais pelos quais eles se distribuem. Um clássico problema multiobjetivo. Utilizando o STK foi obtido um conjunto de constelações



com diferentes características. Circulares polares (figura 5), do tipo Walker-delta com alguma excentricidade (a figura 6 é um exemplo) e até do tipo Molniya (Figura 7)

4. Resultados

O conjunto de constelações avaliadas é apresentado na Tabela 1, com seus respectivos dados normalizados na Tabela 2.

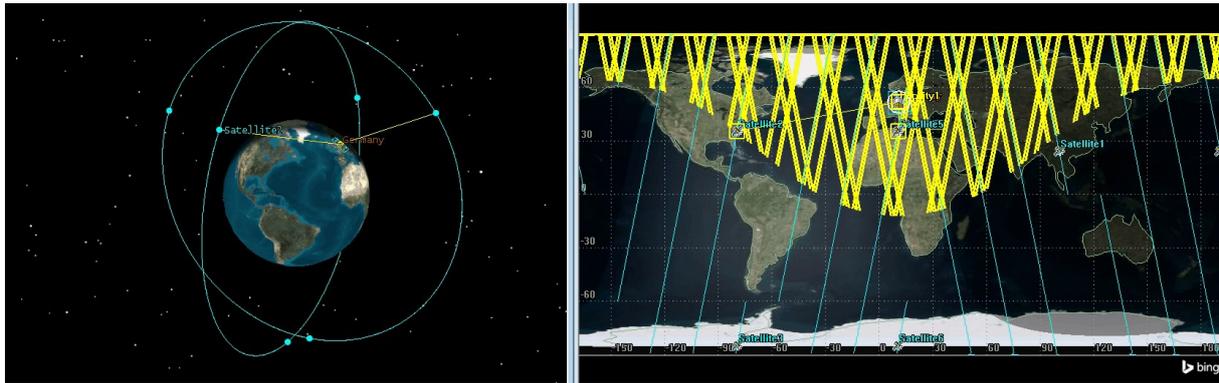


Figura 5. Constelação com 6 satélites em órbitas polares. À esquerda a representação dos satélites em 2 planos orbitais. À direita, os traços em amarelo representam o estabelecimento de contato entre os satélites e a estação de rastreamento (Facility1)

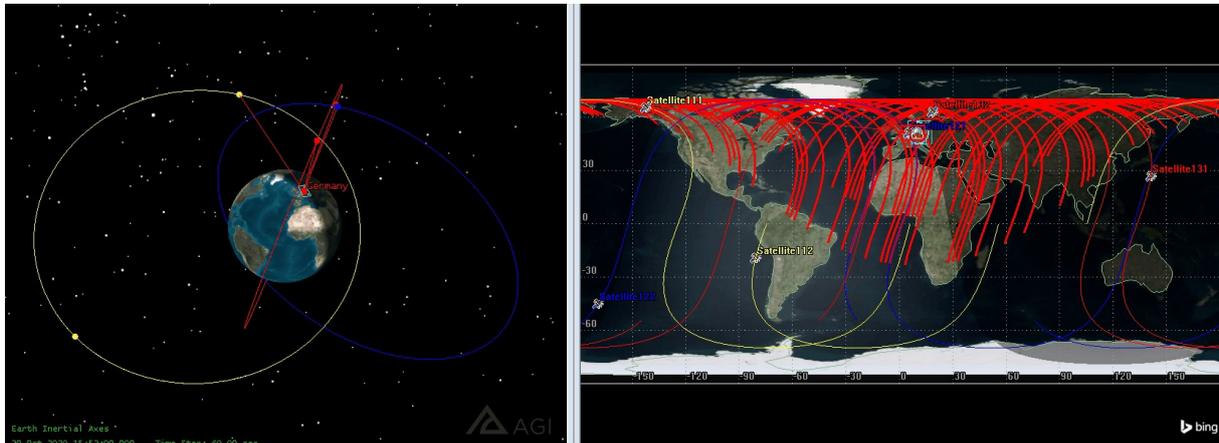


Figura 6. Constelação do tipo Walker-delta com 6 satélites distribuídos em 3 planos orbitais

A tarefa é minimizar a função objetivo em relação aos três parâmetros avaliados (h , T e P). Observando diretamente a tabela 1 e adotando o método de Pareto, verifica-se que em relação à variável h , a melhor solução é dada pela constelação denominada Walker 40/5/1; em relação a T é a Molniya-2 e em relação a P há duas candidatas, 4 inclinação crítica e Molniya - 2,



ou seja, temos um conjunto de 3 soluções ótimas, chamadas *não-dominadas*. A partir deste ponto seria necessário recorrer a um método complementar de seleção, o que implica um certo grau de subjetividade.

Com um pequeno universo de soluções viáveis como o apresentado é possível notar que o método de Pareto oferece algumas soluções plausíveis e que, em tese, uma delas poderia ser adotada sem qualquer prejuízo em relação às outras. Porém, em problemas de engenharia é

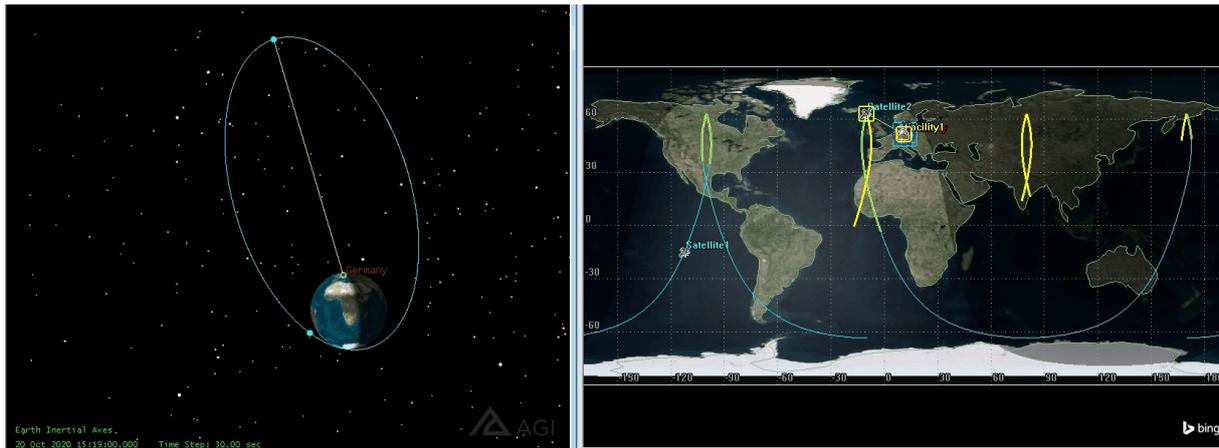


Figura 7. Constelação com 2 satélites em órbitas Molniya

configurações	h (Km)	T	P
4 inclinação crítica	12000	4	1
6 circular polar	8000	6	2
Walker 12/4/1	2500	12	4
Walker 24/4/1	1300	24	4
Molniya - 2	26553	2	1
Walker 6/3/1	17878	6	3
8 circular polar	3000	8	8
Walker 40/5/1	700	40	5

Tabela 1. Conjunto de 8 constelações que oferecem cobertura contínua para a Alemanha.

configurações	h/ h max	T/ T max	P/ P max
4 inclinação crítica	0,452	0,100	0,125
6 circular polar	0,301	0,150	0,250
walker 12/4/1	0,094	0,300	0,500
Walker 24/4/1	0,049	0,600	0,500
Molniya	1,000	0,050	0,125
Walker 6/3/1	0,673	0,150	0,375
8 circular polar	0,113	0,200	1,000
Walker 40/5/1	0,026	1,000	0,625

Tabela 2. Dados da Tabela 1 normalizados



conveniente adotar um procedimento que acesse todas as alternativas simultaneamente. Por exemplo, uma solução de menor perda para todos os objetivos (ROCCO, 2002). Tomemos como exemplo o mesmo conjunto, porém com os dados normalizados da tabela 2. Pode-se construir a figura 8, inscrevendo um triângulo, cujos vértices associam-se aos 3 objetivos, em um círculo no qual as distâncias entre o baricentro e os vértices seja o raio r . Para melhor visualização dos resultados um recorte com os valores extremos, aqueles cujos triângulos têm a maior e menor área, ou seja, que minimizam e maximizam as soluções, são apresentados na figura 9.

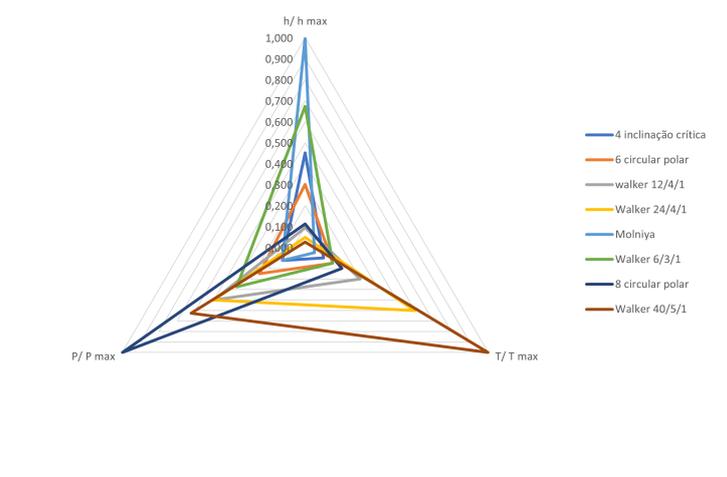


Figura 8. Conjunto de todas as constelações avaliadas representadas pelo critério na menor perda pelo método proposto

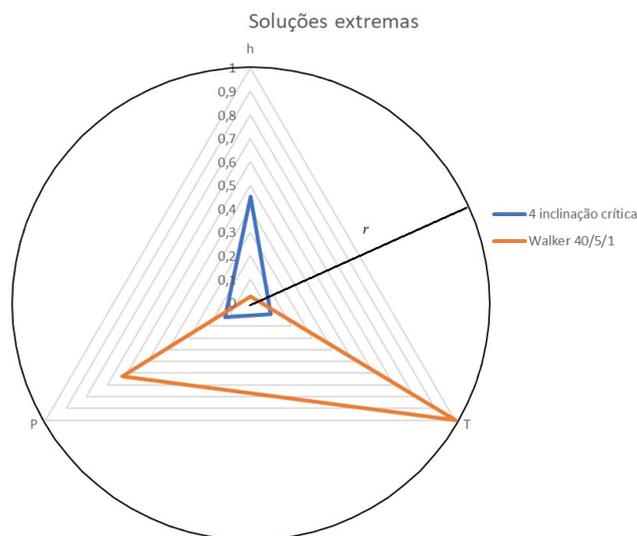


Figura 9. Soluções extremas encontradas

Assim, verifica-se que a constelação que minimiza o problema nesse conjunto é aquela denominada *4 inclinação crítica*. Simplesmente comparando-se as áreas dos triângulos. Esta é



uma das possibilidades que seriam consideradas pelo método de Pareto, ao lado de outras, porém adotando-se o Critério da Menor Perda é possível tomar uma decisão objetiva sem precisar lançar mão de critérios de seleção sujeitos às condições do avaliador ou projetista.

5. Conclusão

Foram apresentadas algumas ideias para a configuração de constelações de satélites e as inúmeras possibilidades disponíveis. Para lidar com elas de maneira objetiva recorre-se a métodos de otimização e critérios de seleção, no entanto, mesmo com um conjunto pequeno e ilustrativo como o apresentado aqui e simplificando ao máximo o problema, levando em conta somente poucos parâmetros, o método clássico de Pareto ainda oferece uma série de soluções. O Critério da Menor Perda apresentou uma solução objetiva, sem estar sujeita a regras determinadas a priori.

No caso apresentado não havia restrições, então foi possível avaliar configurações bem díspares, o que é interessante sob o aspecto ilustrativo proposto para a apresentação de uma forma alternativa para avaliar-se o Critério da Menor Perda.

Referências

- BALLARD, A. H. Rosette constellations of earth satellites. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, n. 5, p. 656–673, 1980.
- BRODKIN, J. With latency as low as 25ms, spacex to launch broadband satellites in 2019. *Ars Technica*, May, 2017.
- EASTON, R.; BRESCIA, R. *Continuously visible satellite constellations*. [S.l.], 1969.
- GOBETZ, F. W. Satellite networks for global coverage. *Advances in The astronautical sciences*, Elsevier, v. 9, p. 134–156, 1963.
- HITOMI, N.; SELVA, D. Constellation optimization using an evolutionary algorithm with a variable-length chromosome. In: IEEE. *2018 IEEE Aerospace Conference*. [S.l.], 2018. p. 1–12.
- KOPACZ, J. R. *Satellite Constellation Deployment and Management*. Tese (Doutorado) — University of Denver, 2020.
- MATOSSIAN, M. G. Improved candidate generation and coverage analysis methods for design optimization of symmetric multisatellite constellations. *Acta astronautica*, Elsevier, v. 40, n. 2-8, p. 561–571, 1997.
- MOZHAEV, G. The problem of the continuous earth coverage and the kinematically regular satellite networks. i. *CosRe*, v. 11, p. 755, 1973.
- PARETO, V. *Manual de economia política*. [S.l.]: Abril Cultural São Paulo, 1984.
- ROCCO, E. M. Manutenção orbital de constelações simétricas de satélites utilizando manobras impulsivas ótimas com vínculo de tempo. *São José dos Campos*, 2002.
- ROCCO, E. M.; PRADO, A. F. B. de A. et al. Station keeping of constellations using multiobjective strategies. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi, v. 2013, 2013.
- SAVITRI, T. et al. Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semianalytical approach. *International Journal of Aerospace Engineering*, Hindawi, v. 2017, 2017.
- WALKER, J. G. *Circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage*. [S.l.], 1970.