OTIMIZAÇÃO DO AGENDAMENTO DE COMUNICAÇÕES COM SATÉLITES

Victor de Sá Nunes
Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP
Rodovia Presidente Dutra, Km 145, s/n - Jardim Diamante, São José dos Campos – SP
victor.desanunes@gmail.com

Felipe Leonardo Lobo Medeiros
Instituto de Estudos Avançados – IEAv
Trevo Coronel Aviador José Alberto Albano do Amarante, n° 1
CEP: 12.228-001 - São José dos Campos – SP
felipe@ieav.cta.br

Mônica Maria De Marchi
Instituto de Estudos Avançados – IEAv
Trevo Coronel Aviador José Alberto Albano do Amarante, n° 1
CEP: 12.228-001 - São José dos Campos – SP
monica@ieav.cta.br

RESUMO

O emprego efetivo de satélites em diversos contextos atuais requer que sua comunicação com uma estação de solo seja agendada de alguma forma. Este agendamento pode ser modelado matematicamente como um problema de otimização combinatória buscando maximizar a qualidade da comunicação de acordo com a qualidade do sinal de telemetria. Este trabalho tem como objetivo apresentar os avanços alcançados no desenvolvimento de um modelo matemático para o problema de agendamento de comunicações com satélites. Especificamente, foi aplicado um algoritmo genético ao problema de otimização do agendamento de comunicações entre estações de solo e redes de satélites artificiais. Visando avaliar o desempenho do algoritmo, experimentos foram realizados mostrando que o algoritmo foi capaz de obter soluções bastante satisfatórias se comparado à solução ótima de um estudo de caso criado para controle.
PALAVRAS CHAVE. Algoritmo Genético. Otimização. Modelo Matemático

Tópicos:
1 – Metaheurísticas
2 – D&SP – PO em Defesa e Segurança Pública
3 – TEL&SI – PO em Telecomunicações e Sistemas de Informação
4 – OA – Outras aplicações em PO

ABSTRACT

Employing satellites in different contemporary contexts requires that its communication with a ground station be scheduled in some way. This scheduling may be modeled mathematically as a combinatorial optimization problem with the aim of maximizing the communication quality according to its telemetry signal quality. This paper intents to present the achievements in developing a mathematical model to the problem of satellite communication scheduling. Specifically, a genetic algorithm was applied to the scheduling communication problem between ground stations and artificial satellite network. Aiming to evaluate de algorithm performance, experiments were performed showing that the algorithm was able to obtain solutions good enough when comparing to the optimal solution of a study case created for evaluation.

KEYWORDS. Genetic Algorithm. Optimization. Mathemetical Model.

https://proceedings.science/p/85306?lang=pt-br

1. Introdução

Um satélite artificial é um veículo espacial colocado em determinada órbita de um corpo celeste. Satélites artificiais vêm sendo utilizados principalmente: em sistemas de sensoriamento remoto, visando, por exemplo, o monitoramento climático ou a obtenção de imagens da superfície terrestre; em sistemas de posicionamento e navegação; e nos mais variados processos de comunicação. Um exemplo de satélite artificial é o telescópio espacial Hubble, que orbita a Terra.

Este trabalho aborda um sistema de satélites composto por uma rede de satélites, estações de solo e geradores de demandas. A estrutura desse sistema foi obtida de [Alvarez e Erwin, 2015] e começou a ser explorada em [Nunes et. al., 2017]. Um exemplo simplificado dessa estrutura é apresentado na Figura 1.

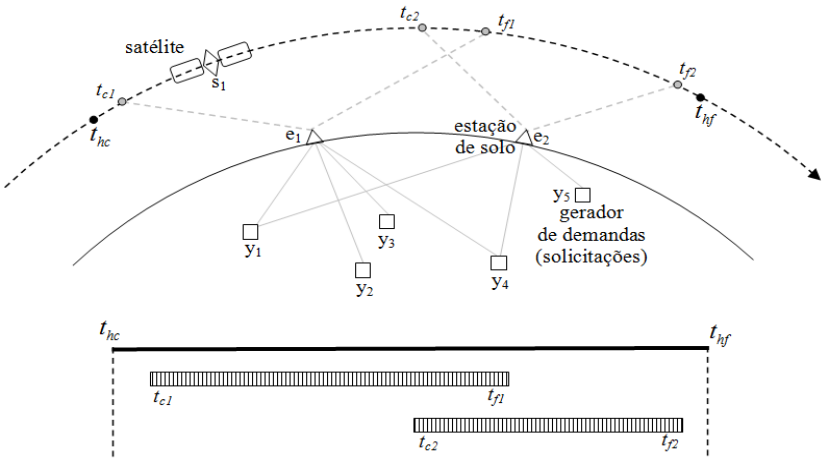


Figura 1. Exemplo de um sistema de comunicação com satélites.

Como descrito em [Nunes et al, 2017], no sistema em estudo os satélites podem se comunicar com as estações de solo durante intervalos de tempo denominados janelas de visibilidade que, na Figura 1, são as janelas $[t_{c1},t_{f1}]$ e $[t_{c2},t_{f2}]$. Essas janelas são discretizadas em unidades de tempo e definidas pelo alcance do sistema de telemetria/comunicação entre os satélites e as estações de solo. A deterioração da qualidade do sinal de telemetria aumenta à medida que o satélite se aproxima dos limites da janela. O intervalo de tempo $[t_{hc},t_{hf}]$, que contém essas janelas, é denominado horizonte de agendamento. No intervalo $[t_{hc},t_{hf}]$ o satélite s_1 pode estar dentro do alcance de múltiplas estações de solo simultaneamente.

Geradores de demandas enviam, para as estações de solo, um conjunto de solicitações de interação/comunicação com satélites. Cada solicitação y_i deve ser alocada em uma das janelas de visibilidade definidas por um satélite s_i e uma estação de solo de índice e_i. Cada solicitação corresponde a um intervalo de tempo $[r_i,d_i]$.

As estações de solo são responsáveis pelo agendamento das comunicações solicitadas, considerando as janelas disponíveis e restrições de comunicação como, por exemplo, não preemptividade e não redundância. A restrição de não preemptividade significa que uma solicitação de comunicação deve ser completada sem interrupções. Já a restrição de não redundância evita que um satélite se comunique com mais de uma estação de controle ao mesmo tempo, ou que uma estação de controle se comunique com mais de um satélite ao mesmo tempo.

Devido ao número limitado de estações de solo, ao aumento do número de satélites e da demanda de comunicação, o agendamento manual não conseguirá lidar com a complexidade do problema. [Barbulescu et. al. 2002]

Assim, o processo de agendamento de comunicações pode ser modelado matematicamente como um problema de otimização combinatória, cujo objetivo é maximizar a qualidade de tais comunicações em relação à qualidade do sinal de telemetria. Uma meta-heurística de inteligência

artificial, empregada com êxito em problemas de otimização combinatória, é o algoritmo genético [Holand, 1992].

2. Descrição do Problema

Como descrito em [Nunes et al, 2017], no problema de agendamento de solicitações de comunicação com uma rede de satélites, cada solicitação é definida formalmente pela seguinte equação:

$$y_i = \left(s_i, e_i, r_i, d_i, \underline{\rho_i}, \overline{\rho_i}, J_i, f_i\left(Q_j\right)\right) \qquad (1)$$

Em que: i é o índice de uma solicitação; s_i é o satélite que atenderá à solicitação y_i; e_i é a estação de solo que alocará a solicitação y_i em uma janela de visibilidade j, tal que $j \in j_i$ é uma das janelas definidas pelo satélite s_i; r_i e d_i são, respectivamente, os tempos inicial e final do intervalo de tempo alocado da solicitação y_i em uma das janelas visíveis a e_i; $\underline{\rho_i}$ e $\overline{\rho_i}$ são, respectivamente, os intervalos de tempo mínimo e máximo de cada solicitação y_i; $f_i\left(Q_j\right)$ é uma função que retorna a qualidade do sinal de telemetria nos n_j subintervalos regulares de tempo que formam a janela j; $Q_j = \left(q_{j1}, q_{j2}, ..., q_{jn_j}\right)$ representa a qualidade, em termo de sinal de telemetria, de cada subintervalo de tempo de uma janela discretizada j; $q_{jk} \in (0,1]$ é, portanto, a qualidade do k-ésimo subintervalo de tempo da janela de visibilidade j. Um exemplo de alocação de uma solicitação em uma janela de visibilidade é apresentado no esquema da Figura 3.

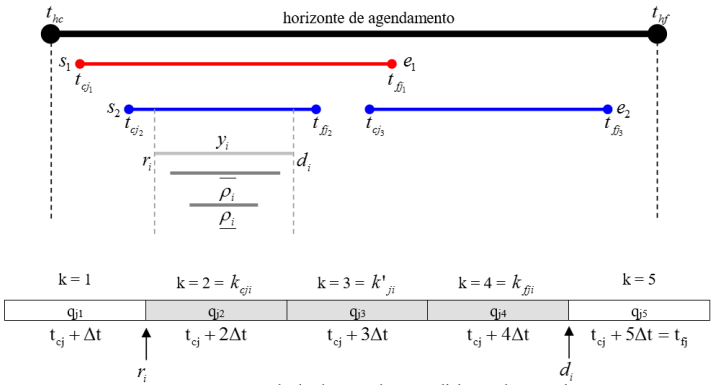


Figura 3. Exemplo de alocação de uma solicitação de comunicação.

No exemplo da Figura 3 as três células na cor cinza representam a alocação da solicitação y_i na janela j; o valor de $\underline{\rho_i}$ é igual ao valor de $\overline{\rho_i}$; Δt é o valor de tempo de cada subintervalo regular da janela j; k_{cji} e k_{fji} são, respectivamente, os índices das células (subintervalos) em que estão alocados o tempo inicial e o tempo final da solicitação i na janela j; e k'_{ji} é o índice da parcela que corresponde à metade da solicitação i alocada na janela j; e, para efeito de simplificação, considerou-se que $t_{cj}, t_{fj}, r_i, d_i, \underline{\rho_i}, \overline{\rho_i}$ e Δt são números inteiros.

A Figura 4 apresenta a distribuição da qualidade do sinal de telemetria em uma janela de visibilidade composta por cinco subintervalos.

https://proceedings.science/p/85306?lang=pt-br

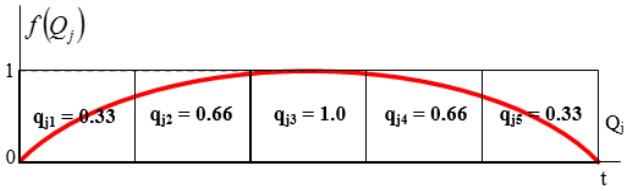


Figura 4. Exemplo da distribuição da qualidade do sinal de telemetria em uma janela de visibilidade.

O valor que representa a qualidade do sinal de telemetria de cada subintervalo $q_{jk} \in (0,1]$ é definido por:

$$q_{jk} = \begin{cases} k \dfrac{1}{\left\lceil \frac{n_j}{2} \right\rceil}, \text{para k} \leq \left\lceil \frac{\text{n}_\text{j}}{2} \right\rceil \\ (n_j - k + 1) \dfrac{1}{\left\lceil \frac{n_j}{2} \right\rceil}, \text{para k} > \left\lceil \frac{\text{n}_\text{j}}{2} \right\rceil \end{cases} \quad (2)$$

Em que: k é o índice de um subintervalo regular de tempo da janela de visibilidade j e $\left\lceil \frac{n_j}{2} \right\rceil$ é o primeiro valor inteiro maior ou igual a $\frac{n_j}{2}$.

2.1. Modelo Matemático

O modelo matemático apresentado é uma simplificação do modelo matemático proposto em [Álvarez e Erwin, 2015], o qual considera ainda a restrição de relaxação de cada intervalo de tempo solicitado.

Considerando um conjunto de satélites e um conjunto de estações de solo. Geradores de demanda enviam suas solicitações de comunicação para satélites, através de estações de solo. É esperado que todas as solicitações sejam alocadas respeitando algumas restrições e maximizando a qualidade das comunicações.

Em geral, um agendamento, que seria a entrada do problema, pode ser definido por:

$$A = \{S, E, D, J\} \quad (3)$$

Onde S é o conjunto de todos os satélites, E o conjunto de estações de solo, D o conjunto de todas as solicitações enviadas pelos geradores de demandas, sendo $|D| = m$, e J o conjunto de todas as janelas de visibilidade.

Baseado nas definições anteriores, o modelo matemático do problema é definido a seguir:

Função objetivo:

$$max\left(\sum_{i=1}^{m} w_i q_{jk'ji}\right) \quad (4)$$

A Equação 4 está sujeita às seguintes restrições:

$$j \in J_i \quad (5)$$

$$t_{cj} \leq r_i \leq d_i \leq t_{ff} \quad (6)$$

$$r_i = t_{cj} + (k_{cji} - 1)\Delta t \quad (7)$$

$$\sum_{k_{ji}=k_{cji}}^{k_{ffi}} x_{jk_{ji}} = \overline{\rho_i} \text{ para } x_{jk_{ji}} = \{0,1\} \quad (8)$$

$$r_{i_1} > d_{i_2} \text{ ou } d_{i_1} < r_{i_2} \ \forall(i_1 \neq i_2 \, e \, j_1 \neq j_2) \text{ ou } \forall(i_1 \neq i_2, \ j_1 \neq j_2 \, e \, e_1 = e_2) \quad (9)$$

Em que: j e k'_{ji} são as variáveis decisórias do problema; m é o número de solicitações; k_{ji} é o índice de uma parcela da solicitação i alocada na janela j; k_{cji} e k_{ffi} são, respectivamente, os índices das células (subintervalos) em que estão alocados o tempo inicial r_i e o tempo final d_i da solicitação $\boldsymbol{i}$ na janela j; k'_{ji} é o índice da parcela que corresponde à metade da solicitação $\boldsymbol{i}$ alocada na janela j; $\lceil a \rceil$ é o primeiro valor inteiro maior ou igual a a; $w_i \in [0,1]$ é a prioridade (peso) da solicitação i; $\overline{\rho_i}$ é um número inteiro e significa o tamanho, isto é, o número de subintervalos da solicitação y_i; Δt é o valor de cada subintervalo regular de tempo; $X_j = (x_{j1}, x_{j2}, ..., x_{j(n_j-1)}, x_{jn_j})$, com $x_{jk} \in \{0,1\}$, é uma representação binária da janela j; e o valor da célula x_{jk} é igual a 1, se uma parcela de alguma solicitação estiver alocada no subintervalo de tempo equivalente a x_{jk}, e 0 caso contrário.

A Equação 5 descreve que a janela j é uma das janelas visíveis à estação de índice e_i, que recebe a solicitação de índice i. A Equação 6 especifica que o intervalo de tempo da solicitação $[r_i, d_i]$ deve estar contido na janela de índice j. A Equação 7 relaciona o valor de r_i com a primeira célula (subintervalo de tempo) de índice k_{cji} alocada para a solicitação y_i na janela j. A Equação 8 é a restrição de não preemptividade, indicando que as solicitações não podem ser interrompidas. A Equação 9 é a restrição de não redundância. Esta restrição indica que duas solicitações não podem ocorrer ao mesmo tempo, quando: estiverem alocadas na mesma janela de tempo (um satélite não pode se comunicar com duas ou mais estações de solo ao mesmo tempo), ou quando estiverem alocadas em janelas diferentes (uma estação de solo não pode se comunicar com dois satélites ao mesmo tempo), mas pertencerem a uma mesma estação de solo. Neste trabalho, considerou-se que todas as solicitações têm a mesma prioridade, isto é, $w_i = 1 \, \forall i$.

2.2. Algoritmo Genético

Algoritmos Genéticos (AGs) são meta-heurísticas de otimização, baseadas na teoria de seleção natural proposta por Charles Darwin e foi incialmente proposto por John Holland [Lucas, 2002], utilizadas para encontrar soluções aproximadas em problemas dos mais diversos envolvendo otimização e busca.

Para desenvolver o algoritmo o indivíduo foi modelado contendo 4 solicitações. E cada solicitação contém 7 informações. A primeira corresponde à janela em que a solicitação foi alocada; a segunda corresponde ao ponto médio da solicitação; a terceira informa a posição inicial da solicitação. A quarta mostra a posição final; a quinta indica qual a estação de comunicação responsável pela solicitação; a sexta e sétima linha trazem informações sobre a janela em que a solicitação foi alocada com relação ao horizonte de agendamento. A Figura 5 a seguir apresenta um exemplo de indivíduo.

https://proceedings.science/p/85306?lang=pt-br

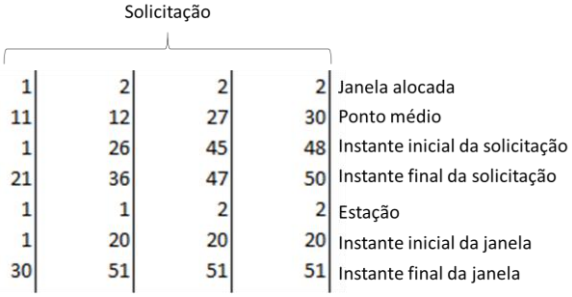


Figura 5. Modelagem do indivíduo para o algoritmo

O processo de seleção é outro processo importante do AG impactando na convergência do algoritmo. Existem diversos esquemas de seleção propostos na literatura para tentar selecionar os melhores indivíduos, o mais simples de todos é o método que seleciona os n indivíduos com melhor valor resultante da função de aptidão, esse método mais simples está mais sujeito a problemas como a convergência muito rápida para um ótimo local. Neste trabalho foi implementado a seleção por roleta e seu funcionamento é explicado em [Goldberg, 1989].

O operador de *crossover* baseia-se no processo de recombinação genética entre indivíduos da população, garantindo que parte do código genético dos indivíduos selecionados para a reprodução seja transmitido para as gerações futuras. Neste trabalho será utilizado um operador de *crossover* com um único ponto de corte. Este operador consiste em cortar dois indivíduos em duas partes cada, e recombinar tais partes gerando dois novos indivíduos. Através desse operador, deverão ser criados novos indivíduos (soluções do agendamento das solicitações) que irão substituir os piores indivíduos da geração anterior. Como será utilizado um ponto de corte apenas, a cada operação de *crossover* deverão ser gerados dois novos indivíduos.

Com o fito de causar pequenas perturbações nas soluções como é proposto em uma das etapas do AG, foi pensado realizar pequenos deslocamentos das solicitações agendadas dentro das janelas, respeitando as restrições do problema, causando assim uma perturbação na variável decisório k'_{ji}.

Finalmente, a cada iteração do algoritmo a população deverá passar pelas etapas anteriores afim de criar uma nova população, então, é verificado se as condições de encerramento da evolução foram atingidas, retornando para a etapa de avaliação em caso negativo e encerrando a execução em caso positivo. A Tabela 1 a seguir apresenta o pseudocódigo para o algoritmo genético implementado.

Tabela 1. Algoritmo Genético

Etapas	Descrição
1	A população P é inicializada;
2	É aplicado o teste de aptidão nos indivíduos de P
3	**Enquanto** a condição de parada não é satisfeita **faça**
4	Seleção;
5	*Crossover* em pares de indivíduos de P;
6	Mutação em alguns indivíduos de P;
7	Teste de aptidão em P;
8	**Fim**

3. Resultados e Discussão

Inicialmente foi criado um Estudo de Caso (EC) para a análise do modelo matemático. A solução ótima deste EC é apresentada na Tabela 2. O horizonte de agendamento possui 50 posições e há duas janelas de solicitação, tendo a primeira janela 30 intervalos e a segunda, 31 intervalos. A Tabela 2 apresenta a posição em que o ponto médio de cada solicitação da solução ótima foi agendado, bem como em qual janela foi alocado o agendamento.

Tabela 2. Posição do ponto médio alocado nas janelas e o valor da qualidade do sinal

Janela alocada	Ponto médio da solicitação	Qualidade
1	15	1.00
2	13	0.81
2	21	0.69
2	25	0.44

O valor da solução ótima é 2.94, obtido da Equação 4, ou seja, $(1 \times 1.00) + (1 \times 0.81) + (1 \times 0.69) + (1 \times 0.44)$.

No caso do algoritmo genético, foram realizados alguns experimentos em que o número de gerações foi fixado em 10000 e o número de indivíduos criados a cada geração foi fixado em 5; variou-se os parâmetros da taxa de *crossover* e da taxa de mutação ao longo dos experimentos.

Cinco instâncias de testes (*seed* variando de 1 a 5) foram criadas. Nestas instâncias de testes foram obtidos: o tempo médio gasto para terminar a execução do algoritmo e a geração em que o primeiro "melhor indivíduo" foi encontrado. Como "melhor indivíduo" entende-se aquele com valor de aptidão maior ou igual a 90% do valor de aptidão obtido pelo indivíduo no EC (que para este caso foi de 2,94).

Os experimentos foram realizados em um computador com 8Gb de memória RAM, processador Intel i5-6200U com clock de 2.3Ghz. As Tabelas de 3 a 7 e as Figuras de 6 a 10 a seguir mostram os resultados desses experimentos para os valores de *seed* correspondentes a 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Tabela 3. Experimentos para avaliação do algoritmo com semente (*seed)* igual a 1

Taxa de *crossover*	Taxa de mutação	(*)	Tempo médio gasto
10%	90%	54	0.06
15%	85%	46	0.05
20%	80%	44	0.06
25%	75%	50	0.07

Tabela 4. Experimentos para avaliação do algoritmo com semente (*seed)* igual a 2

Taxa de *crossover*	Taxa de mutação	(*)	Tempo médio gasto
10%	90%	40	0.06
15%	85%	48	0.07
20%	80%	60	0.06
25%	75%	66	0.06

Tabela 5. Experimentos para avaliação do algoritmo com semente (*seed)* igual a 3

Taxa de *crossover*	Taxa de mutação	(*)	Tempo médio gasto
10%	90%	38	0.06
15%	85%	40	0.05
20%	80%	42	0.07
25%	75%	35	0.06

Tabela 6. Experimentos para avaliação do algoritmo com semente (*seed)* igual a 4

Taxa de *crossover*	Taxa de mutação	(*)	Tempo médio gasto
10%	90%	36	0.07
15%	85%	51	0.07
20%	80%	49	0.06
25%	75%	70	0.07

Tabela 7. Experimentos para avaliação do algoritmo com semente (*seed)* igual a 5

Taxa de *crossover*	Taxa de mutação	(*)	Tempo médio gasto
10%	90%	56	0.05
15%	85%	59	0.07
20%	80%	69	0.05
25%	75%	184	0.06

(*) Número de gerações para encontrar a solução com valor de aptidão maior ou igual a 90% da solução ótima.

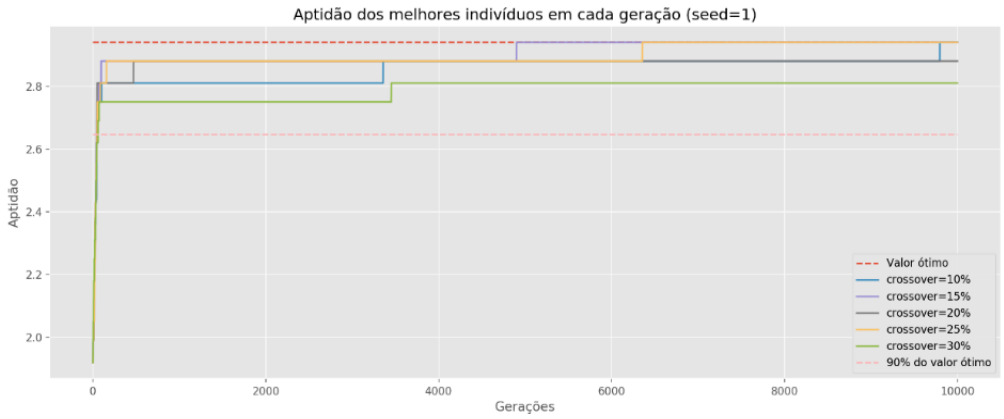


Figura 6. Gráfico da aptidão do melhor indivíduo em cada geração.

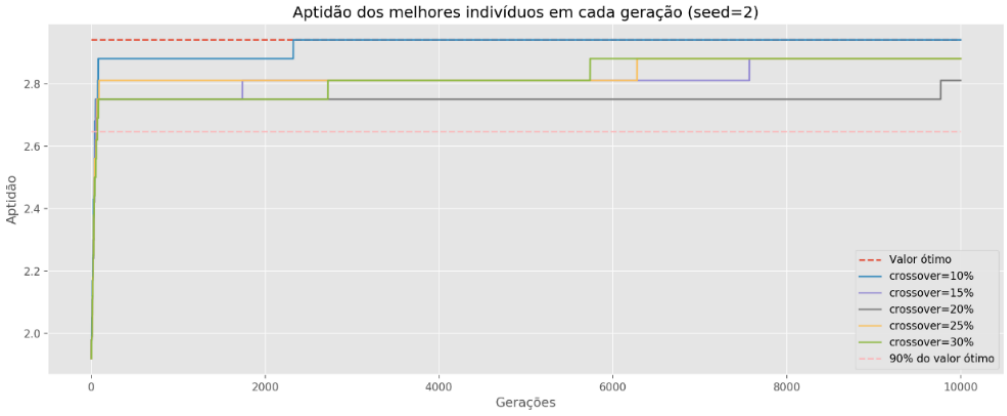


Figura 7. Gráfico da aptidão do melhor indivíduo em cada geração.

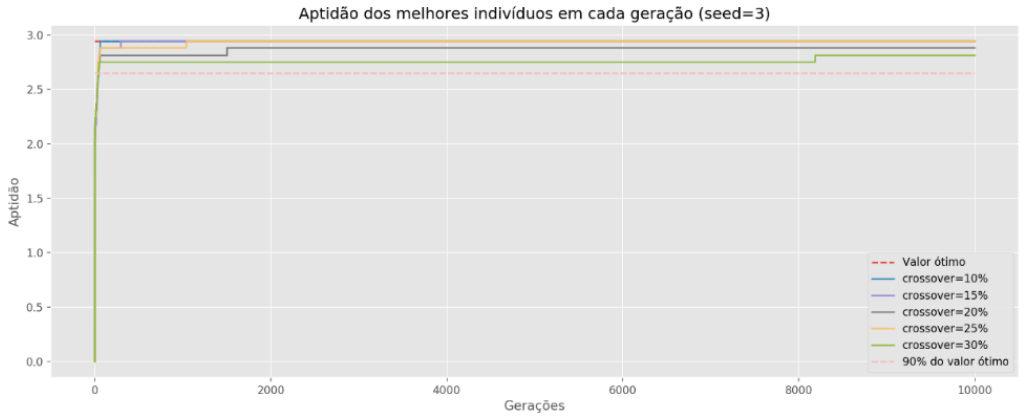


Figura 8. Gráfico da aptidão do melhor indivíduo em cada geração.

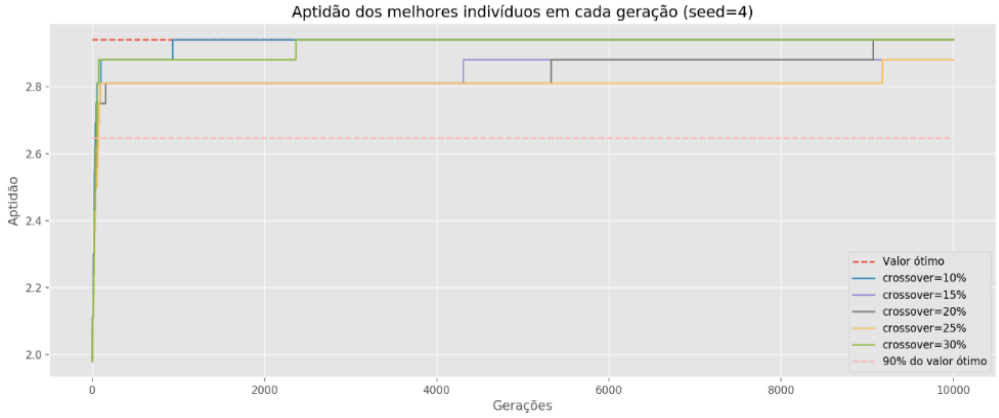


Figura 9. Gráfico da aptidão do melhor indivíduo em cada geração.

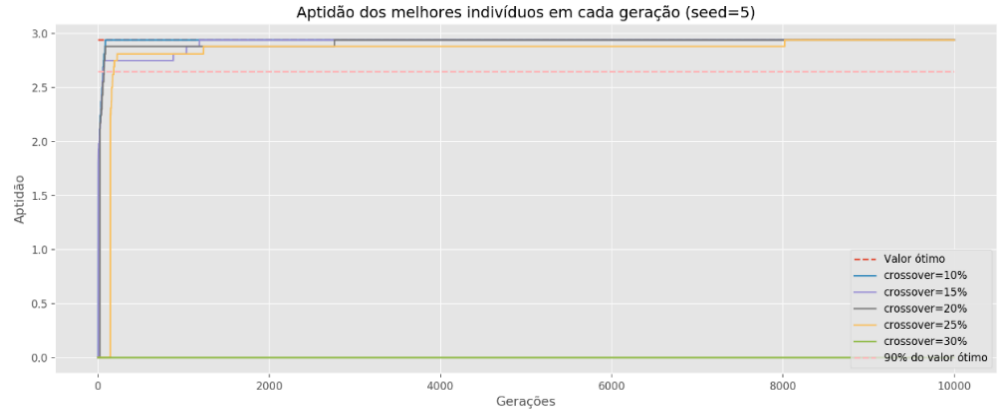


Figura 10. Gráfico da aptidão do melhor indivíduo em cada geração.

Analisando os gráficos é possível ver que para *seed* igual a 5, o algoritmo convergiu mais rápido. Entretanto, para uma taxa de *crossover* de 30%, e *seed* igual a 5, o algoritmo não conseguiu encontrar a solução ótima, tendo permanecido com a população inteira com aptidão igual a zero. Os experimentos tinham como objetivo analisar se o algoritmo conseguiria convergir, e em caso positivo, quanto tempo ele levaria levando em consideração os parâmetros do mesmo.

Aparentemente, para as populações testadas, quanto maior a taxa de *crossover* maior o tempo (em número de gerações) para o algoritmo convergir. Em todos os experimentos a solução foi encontrada com menos de 100 gerações. Vale lembrar que nem todos os experimentos alcançaram a solução ótima, de 2,94. Porém, todos eles encontraram uma solução correspondente a 90% da solução ótima.

4. Conclusões

Os experimentos mostraram que foi possível encontrar a solução ótima em alguns casos partindo de uma população que tinha aptidão zero para todos os indivíduos. Mesmo tendo todos os indivíduos com aptidão zero, a convergência ocorreu rapidamente (antes de 100 gerações). Agora, é preciso entender quais as razões que levam um determinado indivíduo a melhorar mais rapidamente ou não.

Algumas perguntas ainda precisam ser respondidas como quais características dos indivíduos que aceleram a convergência, a relação entre a taxa de *crossover* e o tempo de convergência. Como trabalho futuro, pode ser citado usar a população final de um processamento como nova entrada do problema e checar se a convergência acelera. Além de utilizar outras metodologias de *crossover*, como o *crossover blend*.

Como melhorias no modelo, está sendo trabalhada a implementação de uma alteração no operador de mutação com o objetivo é permitir que uma segunda solicitação de comunicação possa ser alocada para a primeira janela de visibilidade. Atualmente, esta solicitação de comunicação está fixada na segunda janela.

Além disso, pretende-se considerar prioridades nas solicitações de comunicação no modelo matemático. Neste caso, espera-se que as soluções obtidas aloquem as solicitações com maior prioridade no centro da janela de visibilidade, onde o sinal possui maior qualidade.

Referências

Álvarez, A.J.V. e Erwin, R.S. (2015) An Introduction to Optimal Satellite Range Scheduling. Springer Optimization and Its Applications, Springer, Switzerland

Barbulescu, L.; Howe, A.E.; Watson, J.P. e Whitley, L.D. (2002) Satellite range scheduling: A comparison of genetic, heuristic and local search, In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature* — PPSN VII. PPSN 2002. Lecture Notes in Computer Science, vol 2439. Springer, Berlin, Heidelberg

Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley Professional, 432 p.

Holand, J.H. (1992) Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Press, Cambridge, MA.

Lucas, D.C. (2002) Algoritmos Genéticos: uma introdução, Apostila elaborada sob a orientação de Luís Otávio Alvares, para a disciplina de Ferramentas de Inteligência Artificial http://muriloleal.com.br/visao/repositorio/centec/eai/ia//ALGORITMOS%20GEN%C3%89TICOS%20-%20APOSTILA.pdf Acessado: 06-06-2018.

Nunes, V.S.; Silva, L.M.; Medeiros, F.L.L. e De Marchi, M.M. (2017) Modelagem Matemática do Problema de Otimização do Agendamento de Comunicações com Redes de Satélites, In: *VI Simpósio de Ciência, Tecnologia e Inovação do Instituto de Estudos Avançados – VI SCTI – IEAv/DCTA*, p. 293-297. São José dos Campos, SP. IEAv.

Nunes, V.S.; Medeiros, F.L.L. e De Marchi, M.M. (2018) Otimização do Agendamento de Comunicações com Redes de Satélites considerando Prioridades, Submetido para apresentação In:

VI Simpósio de Ciência, Tecnologia e Inovação do Instituto de Estudos Avançados – VI SCTI – IEAv/DCTA. São José dos Campos, SP. IEAv.

https://proceedings.science/p/85306?lang=pt-br