Uso de um Otimizador Comercial para o Agendamento Autônomo de Tarefas a Bordo de Pequenos Satélites

Isabela Peixoto[1], Willer Gomes dos Santos[1] e Fátima Mattiello-Francisco[2]
[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil
[2]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — O agendamento autônomo de tarefas em satélites de observação terrestre consiste em selecionar e agendar para execução, dentre as tarefas candidatas, aquelas que otimizem algum critério de desempenho sem violar nenhuma restrição operacional imposta. Os métodos de solução mais comuns são os algoritmos heurísticos e meta heurísticos. Embora eficientes, esses métodos não fornecem garantias quanto à qualidade da solução. Um otimizador comercial, em contrapartida, pode garantir a qualidade da solução, além de poupar esforços de implementação, e prover testes de validação e verificação dos algoritmos propostos. Apesar disso, seu uso apresenta alguns desafios. Este trabalho investiga o uso de um *framework* de programação matemática comercial no estudo do agendamento autônomo de tarefas a bordo de pequenos satélites.

I. INTRODUÇÃO

Com a popularização das constelações de pequenos satélites, e o aumento da complexidade das missões espaciais, o agendamento autônomo de tarefas em satélites de observação terrestre passou a receber considerável atenção do setor espacial. Conforme constatado por [1], houve um aumento significativo de publicações relacionadas à área a partir de 2018.

O problema do agendamento de tarefas em satélites de observação terrestre consiste em selecionar e agendar dentre um conjunto de tarefas candidatas, aquelas que proporcionam um melhor retorno científico sem violar nenhuma das restrições operacionais [2].

Os métodos de solução mais comuns para o problema citado são baseados em heurísticas ou meta heurísticas, devido à sua eficiência. Outras abordagens relatadas na literatura envolvem métodos baseados em aprendizado de máquina, algoritmos exatos, ou mesmo, o uso de softwares de prateleira, como o GurobiTM e o CPLEX® [1, 3, 4, 5].

Este trabalho investiga o uso do software IBM® ILOG® CPLEX Optimization Studio [4], um framework comercial de programação matemática e programação de restrições, para o estudo do agendamento de tarefas a bordo de pequenos satélites. O objetivo deste trabalho é determinar a viabilidade da adoção desta ferramenta para o problema de agendamento de tarefas a bordo de pequenos satélites.

II. MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE SELEÇÃO DE TAREFAS

Foi adotado, neste trabalho, um modelo de Programação Inteira Mista [6].

Programação Matemática é uma técnica bem estabelecida, amplamente empregada para problemas de planejamento específicos de domínio [7]. Aliada a técnicas de otimização, ela permite modelar e resolver problemas lineares, não-lineares e inteiros [8].

O modelo matemático apresentado nesta seção está baseado no modelo de seleção de tarefas proposto por [9]. No futuro pretende-se integrá-lo a um modelo de agendamento, como o descrito em [10], por exemplo.

TABELA I. PARÂMETROS DO PROBLEMA

Parâmetro	*Descrição*
p	Ganho da tarefa
s	Instante de início da tarefa
f	Instante de conclusão da tarefa
e	Nível de energia consumido pela tarefa
d	Nível de memória ocupada pela tarefa
E_{ij}	Energia acumulada entre as tarefas e , caso elas sejam executadas em sequência
T_{ij}	Tempo mínimo de transição entre as tarefas e , caso elas sejam executadas em sequência
E_{min}, E_{max}	Níveis mínimo e máximo de energia a bordo
D_{min}, D_{max}	Níveis mínimo e máximo de memória a bordo
H	Comprimento do horizonte de planejamento

TABELA II. VARIÁVEIS DO MODELO

Variável	*Descrição*
$E(t)$	Nível de energia no instante t
$D(t)$	Nível de dados no instante t
Z_{ij}	1, se j sucede i imediatamente; 0, caso contrário
z_i	1, se a tarefa i será executada; 0, caso contrário

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^{M} b_i z_i \quad (1)$$

Sujeito a:

$$E(0) = E_0 \quad (2)$$

$$D(0) = D_0 \quad (3)$$

$$E(s_j) = \min\left\{E_{max}, E(s_j - 1) + \sum_{i=1}^{j} E_{ij} Z_{ij}\right\} - e_j z_j \quad (4)$$

$$\forall j \in M$$

$$D(s_j) = \max\{D_{min}, D(s_j - 1) + d_j z_j\}, \forall j \in M \quad (5)$$

$$E(s_j) \geq E_{min}, \forall j \in M \quad (6)$$

$$D(s_j) \leq D_{max}, \forall j \in M \quad (7)$$

$$f_j z_j \leq H, \forall j \in M \quad (8)$$

$$s_j - f_i \geq T_{ij} Z_{ij}, \forall i, j \in M \mid i < j \quad (9)$$

$$z_j, Z_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in M$$

$$u(s_j) = E(s_j - 1) + \sum_{i=1}^{j} E_{ij} Z_{ij} \quad (10)$$

$$y(s_j) = \begin{cases} 1, \text{ se } u_1(s_j) \leq E_{max} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (11)$$

$$u(s_j) \leq y(s_j) E_{max} \quad (12)$$

$$E(s_j) = u(s_j) + \left(1 - y(s_j)\right) E_{max} \quad (13)$$

$$g(s_j) = D(s_j - 1) + m_j z_j \quad (14)$$

$$h(s_j) = \begin{cases} 1, \text{ se } g(b_j) \geq D_{min} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (15)$$

$$g(s_j) \leq h(s_j) D_{max} \quad (16)$$

$$D(s_j) = g(s_j) + \left(1 - h(s_j)\right) D_{min} \quad (17)$$

III. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

TABELA III. COMPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES LINEAR E NÃO-LINEAR

	LINEAR		*NÃO-LINEAR*	
Número de Tarefas	*Ganho*	*Tempo de Execução (segundos)*	*Ganho*	*Tempo de Execução (segundos)*
10	89,2	16,5	89,2	16,5
50	209,6	43,1	209,6	43,1

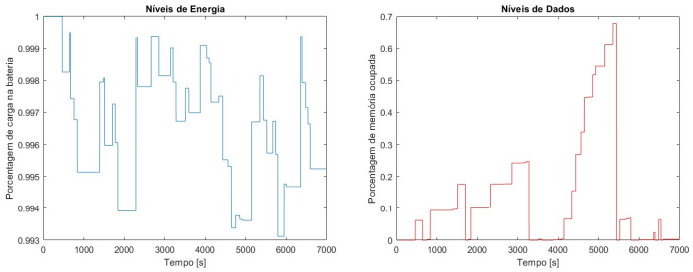

Fig. 1. Níveis de energia em Joules e dados em MB durante a simulação de uma instância de 100 tarefas e horizonte de planejamento de 7 mil segundos. A capacidade máxima da bateria é de 86400 J.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à natureza NP-difícil altamente combinatória, o problema de seleção de tarefas é comumente resolvido com algoritmos heurísticos ou meta heurísticos. Entretanto, existem outras abordagens possíveis, como, por exemplo, utilizar um otimizador comercial. Softwares comerciais costumam ser mais confiáveis do que algoritmos personalizados devido ao extenso processo de validação a que são submetidos, além de reduzirem os esforços de implementação. Por outro lado, como esses softwares implementam algoritmos de solução exatos, os tempos de execução para problemas combinatórios costumam ser muito altos em instâncias de larga escala.

Este trabalho investiga o uso de um framework comercial de programação matemática para o agendamento de tarefas a bordo de pequenos satélites. A principal dificuldade na modelagem é a linearização de certas restrições do modelo, que nem sempre é trivial. A alta demanda computacional de instâncias maiores também prejudicou os experimentos. Entretanto, como mostrado pela Referência [3], um otimizador comercial pode encontrar soluções melhores, quando comparado a um método de busca heurística.

Em investigações futuras, pretende-se explorar diferentes parâmetros de configuração de busca para entender melhor o comportamento do mecanismo de otimização; e expandir o modelo de seleção de tarefas para permitir o agendamento. Ainda, é preciso desenvolver artifícios que permitam um tempo de resposta viável para utilização em bordo e avaliar os impactos sobre a qualidade da solução.

REFERÊNCIAS

1. Wang, Xinwei, et al. Agile Earth observation satellite scheduling over 20 years: formulations, methods and future directions. 2020.
2. Lemaître, Michel, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites. Aerospace Science and Technology. 2002, Vol. 6.
3. Cho, Doo-Hyun, et al. Optimization-Based Scheduling Method for Agile Earth-Observing Satellite Constellation. Journal of Aerospace Information Systems. 2018, Vol. 15, 11.
4. IBM. CPLEX Optimizer. Site da IBM. [Online] [Citado em: 07 de Julho de 2021.] https://www.ibm.com/br-pt/analytics/cplex-optimizer.
5. Gurobi Optimization. Gurobi Optimizer. [Online] [Citado em: 10 de 07 de 2021.] https://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer/.
6. Wolsey, Laurence A. Integer Programming. 2ª Edição. s.l. : John Wiley & Sons, 2021. ISBN: 9781119606536.
7. Ghallab, M. Automated planning : theory and practice. s.l. : Elsevier/Morgan Kaufmann, 2004.
8. IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio OPL Language User's Manual. Versão 12. Release 8.
9. Peng, Shuang, et al. Onboard Observation Task Planning for an Autonomous Earth Observation Satellite Using Long Short-Term Memory. IEEE Access. 2018, Vol. 6.
10. Hall, Nicholas G. e Magazine, Michael J. Maximizing the value of a space mission. European Journal of Operational Research. 1994, Vol. 78.