



# Uma estratégia híbrida de planejamento embarcado de missão para aumentar a capacidade de resposta de um satélite com autonomia operacional em bordo

CIVIDANES, F. <sup>1</sup>, FERREIRA, M. <sup>1</sup>, KUCINSKIS, F. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Aluno de Doutorado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

filipe.cividanesh@inpe.br

---

**Resumo.** Este trabalho apresenta uma estratégia híbrida de planejamento embarcado para controlar um satélite com autonomia operacional em bordo. Tal abordagem combina técnicas de planejamento hierárquico e temporal para o problema de planejamento de missão a bordo de satélites. O principal objetivo dessa abordagem é diminuir o tempo de resposta do planejador em relação a outros sistemas de planejamento desenvolvidos na área espacial. Ao final, apresenta-se um comparativo com outras abordagens existentes e possíveis cenários experimentais que podem ser executados para obtenção de dados de desempenho da abordagem proposta.

---

**Palavras-chave:** Planejamento Automatizado de Missão; Autonomia de Satélites; Planejamento Embarcado; Planejamento Hierárquico e Temporal.

## 1. Introdução

A autonomia a bordo de um satélite pode ser medida como a capacidade da plataforma espacial atender aos objetivos da missão sem apoio do centro de controle durante um determinado período de tempo (Nogueira et al., 2017). Uma das tendências na área espacial é justamente buscar o aumento do nível de autonomia operacional a bordo dos veículos espaciais (Tipaldi e Glielmo, 2018). Suas principais motivações são: aumentar a capacidade de resposta do satélite, reduzir custos de operação e viabilizar a operação de missões complexas que têm pouco tempo de visibilidade com a estação terrena.

As plataformas espaciais com autonomia devem receber objetivos a atingir ao invés de receber uma sequência de comandos enviados por solo. O software de voo deixa de ser um mero executor de comandos e passa a ter inteligência computacional a bordo. Para isso, há uma transferência para o segmento espacial, mesmo que parcial, do processo de planejamento de operação usualmente realizado em solo. Disso, surge uma nova categoria de sistemas espaciais que são os satélites controlados pelo planejamento baseado em objetivos.

Planejamento, em sua forma mais geral, envolve diversos fatores como restrições temporais, consumo e produção de recursos, cooperação e otimização, entre outros aspectos. O planejamento automatizado é a área de Inteligência Artificial (IA) que estuda a



automação do processo de deliberação de ações por meio da computação (Ghallab et al., 2004).

É possível aplicar IA a missões espaciais com um planejador embarcado e uma linguagem de descrição do domínio que tornam possível definir as atividades que levarão o sistema a cumprir os objetivos da missão, considerando as limitações de recursos do satélite. Estudos foram realizados nessa área, destacando-se os experimentos com herança de voo: o *Remote Agent eXperiment* (RAX - Muscettola et al., 1998) concebido para controlar a sonda *Deep Space One* (DS-1) e o *Autonomous Sciencecraft Experiment* (ASE - Chien et al., 2005) usado para controlar as atividades do satélite *Earth Observing One* (EO-1) através do planejador embarcado (*Continuous Activity Scheduling, Planning, Execution and Replanning* - CASPER - Knight et al., 2001). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) também vem realizando estudo nesta área, vide Kucinskis e Ferreira (2013).

A maioria dos trabalhos da área espacial, inclusive o do INPE, utilizou um planejador temporal baseado em *timelines*. Nele, os objetivos de missão são transformados em restrições de estados dos satélites que são passíveis de tratamento por um problema de satisfação de restrição (do inglês - *Constraint Satisfaction Problem* - CSP). O uso do planejamento hierárquico em sistemas embarcados, apesar de seu grande potencial, foi pouco explorado até o momento. Ele tem o potencial de prover diferentes níveis de abstração do domínio e reduzir o espaço de busca do problema, aumentando a capacidade de resposta.

Neste artigo, será enfatizada uma estratégia de planejamento embarcado de missão, em fase de desenvolvimento, que explora o planejamento hierárquico aliado a técnicas de planejadores temporais.

## 2. Metodologia

A abordagem de planejamento apresentada neste trabalho está inserida na camada de decisão de uma arquitetura de software embarcado que está sendo desenvolvida no INPE. Para esta arquitetura, deu-se o nome de *Hierarchical Architecture for Real-time Planning Intelligent Applications* (HARPIA), em referência a uma personagem híbrida da mitologia grega. A arquitetura, ilustrada na Figura 1, visa habilitar a autonomia operacional de satélites, tendo como cerne a representação unificada do conhecimento pelos diferentes componentes, o planejamento embarcado e a inferência de estados da plataforma espacial. É composta por três camadas (decisão, controle e aplicação) visando maior modularidade e simplificação. A seguir, descreve-se sumariamente a arquitetura.

A camada de decisão é onde a programação de atividades do satélite é realizada considerando o estado atualizado da plataforma e os objetivos da missão - sejam eles enviados pela equipe de solo ou detectados em bordo. O problema de planejamento de missão reside nessa camada e é onde novos objetivos podem ser identificados a partir de um determinador de objetivos, conforme a Figura 1.

A camada de controle faz a interface direta entre o planejador e a camada de aplicação que mantém o plano de operação por intermédio de um executor de comandos. Sua finalidade básica é controlar as ações do plano, a fim de verificar se foi executado



conforme esperado e se necessário utilizar técnicas para reparo do plano. Caso não seja possível repará-lo, pode-se requisitar uma observação de diagnóstico ao componente de recuperação da arquitetura.

A camada de controle também é responsável por encaminhar para a execução os comandos de mais baixo nível enviados pelo planejador à camada de aplicação. Esta, por sua vez, detém o software de voo convencional de um computador de bordo.

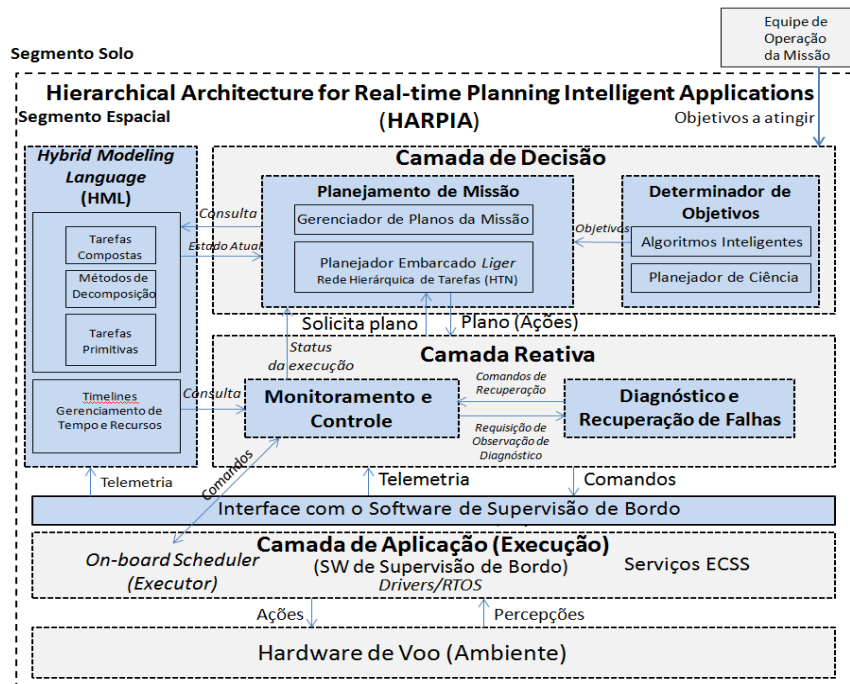


Figura 1. HARPIA - Uma arquitetura de software embarcado baseado em planejamento hierárquico e temporal para habilitar a autonomia operacional de veículos espaciais.

A seguir, o artigo se concentra nas estratégias de planejamento. A grande vantagem de migrar o planejamento de operação em solo para o segmento espacial é diminuir o tempo de resposta para replanear as atividades do veículo espacial. Assumindo, por exemplo, que um algoritmo embarcado identifique a presença de queimadas nas imagens de um satélite de sensoriamento remoto, o segmento espacial pode requisitar outras observações sobre o alvo e encaminhá-las ao planejador embarcado na forma de novos objetivos. Isso aumenta substancialmente a capacidade de resposta do satélite, maximizando o uso dos recursos em bordo.

## 2.1 O Planejamento de Missão

O planejamento de missão da arquitetura HARPIA constrói planos de ações para alcançar os objetivos dos usuários finais da missão. Partindo de um estado inicial (estados dos equipamentos adquiridos via telemetria) e objetivos impostos, ele é capaz de construir um plano de ações para um determinado problema e avaliar a satisfação do objetivo.

O Gerenciador de Planos da Missão recebe os objetivos tanto do segmento solo, como do Determinador de Objetivos. É responsável por mapear os objetivos recebidos em tarefas de



alto nível que são tangíveis ao planejador embarcado. Isto é, deve traduzir um objetivo na forma de tarefas que o sistema deve executar a partir da consulta à representação do conhecimento em Rede Hierárquica de Tarefas (do inglês - *Hierarchical Task Network* - HTN) da arquitetura.

O planejador embarcado da HARPIA tem uma proposta que o difere dos sistemas de planejamento existentes na área espacial. Ele combina o planejamento hierárquico aliado à forma de gerenciar tempo e recursos da abordagem de 'Linhas do Tempo' ou, em inglês, *timelines*. Esse conceito tem sido utilizado por planejadores temporais para prover histórico, estado atual ou projeções para um recurso do sistema. Cada atividade que altere os recursos do sistema pode ser alocada e gerenciada por uma *timeline*. Ela tem sido empregada com sucesso em sistemas espaciais com autonomia (Mayer et al., 2016), pois se aproxima à forma real de operação de um satélite, além de unificar as etapas de planejamento e escalonamento (Fratini et al., 2008).

## 2.2 O Algoritmo de Planejamento *Liger*

Ao invés de buscar um estado-objetivo como no CSP, as técnicas de planejamento automatizado baseado em HTN tentam realizar um objetivo a partir da decomposição de tarefas de alto nível em subtarefas hierarquicamente menores até chegarem às tarefas primitivas. Para cada tarefa composta, o planejador escolhe um método aplicável e instancia-o para decompor a tarefa em subtarefas.

Os métodos podem ter precondições para sua execução e efeitos de suas ações no sistema. O HTN tem desempenho bastante eficiente em tempo de execução (Zhang et al., 2006), pois os métodos guiam a busca do problema, gerando somente planos que são soluções para o problema. Esse é um dos principais motivos para sua adoção.

O algoritmo de planejamento da HARPIA é baseado em um planejador HTN do tipo busca progressiva e de ordem total (*Total-order Forward Decomposition*). A busca é percorrida na direção do nó raiz da árvore (tarefa-objetivo) aos nós folhas (ações primitivas), conforme a Figura 2.

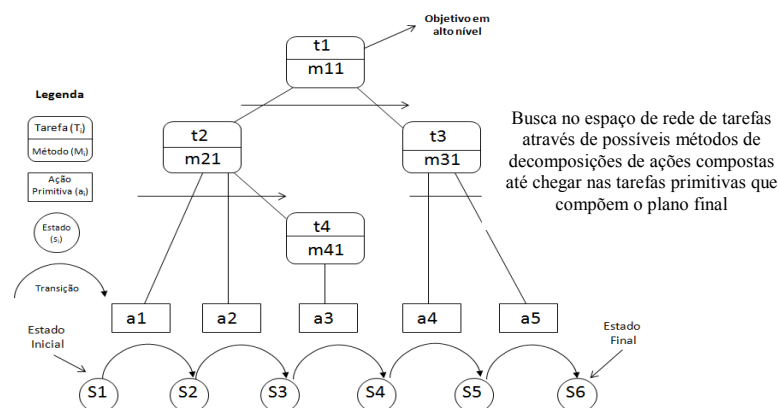


Figura 2. Exemplo de um objetivo descrito como uma rede hierárquica de tarefas (HTN) a partir de uma árvore de decomposição.

Devido à estratégia progressiva, o planejador sempre mantém controle do estado atual do sistema modelado em tempo de planejamento. Por ser de ordem total, o plano final já



considera a ordem exata das ações a serem executadas. A característica de ordem total é interessante, pois não impõe a necessidade de um executor inteligente na camada de controle para selecionar os momentos exatos da execução de cada comando, como existe no ASE e RAX. Esses trabalhos relataram problemas ao raciocinar sobre modelos distintos para as etapas de planejamento e execução do plano.

Ao planejador HTN da arquitetura deu-se o nome de *Liger* (nome do maior felino do planeta, também um híbrido), em função de sua abordagem híbrida com propriedades de planejamento hierárquico e temporal. Nessa abordagem, utilizamos as *timelines* para gerenciamento de recursos e tempo durante a busca do plano, tanto para a consulta das precondições dos métodos, como para registro dos efeitos das ações que alterem recursos do satélite. O estado da arte atual dos planejadores HTN raramente considera a alocação de recursos e tempo, sendo, portanto, um tema pouco explorado segundo Qi et al., (2017).

O algoritmo é do tipo '*hand-tailored*', dado que o motor de busca é independente de domínio, mas os métodos e tarefas são de domínio específico. Isso apresenta, em geral, uma boa relação custo-benefício entre eficiência e generalidade (Amigoni et al. 2010). Para a implementação do motor de busca do HTN, utiliza-se a forma iterativa ao invés da recursividade, evitando eventuais problemas de memória e complexidade que podem ser potencialmente perigosos ao ambiente embarcado da área espacial.

Embora a estratégia de comprometimento fraco (*last commitment*) seja um recurso bastante utilizado em HTN, entendemos que ela é incompatível com a proposta da abordagem híbrida. Postergar decisões sobre restrições de recursos e tempo podem levar a estados incertos dependendo da ramificação da árvore que o algoritmo escolher. Considerando isso, o *Liger* adota a estratégia de comprometimento antecipado (*early commitment*), onde a qualquer instante é possível conhecer o estado atual dos recursos.

Para manipulação temporal das ações do plano, será utilizado o conceito de pontos no tempo, também conhecido como instantes sem duração, conforme proposto por Vilain e Kautz (1986). Em geral, os planejadores HTN impõem restrições temporais relativas ao início e fim de cada atividade. Entendemos que essa estratégia se distancia da forma real de operação de um satélite controlado por comandos, onde seus efeitos são percebidos imediatamente no sistema. Na HARPIA, as informações temporais serão estabelecidas em função dos objetivos recebidos, do estado e do plano de operações corrente do satélite.

As premissas do planejador *Liger*, atualmente em desenvolvimento, são:

- Ser completamente observável, ou seja, sempre é possível saber com precisão qual é o estado corrente do mundo através da telemetria do satélite ou pelo modelo comportamental da linguagem de domínio (*early commitment*).
- Ser finito na quantidade de estados, uma vez que o domínio é escrito previamente por especialistas da área espacial;
- Ter sequências e ações determinísticas, uma vez que utiliza técnicas deterministas de planejamento (HTN); isso é útil pois facilita os testes;
- Considerar eventos exógenos do sistema (por exemplo, entrada em eclipse do satélite) influenciam durante a busca pelo plano. Em muitos problemas da área de planejamento essa dinâmica é desconsiderada;



- Ter tempo discreto entre ações, ou seja, apenas uma ação ocorre por vez e o tempo de sua duração é irrelevante (utiliza a abordagem atemporal baseada em instantes);
- Ter objetivos restritos, ou seja, só é permitido lidar com objetivos que foram especificados explicitamente.

Por último, apresenta-se na Tabela 2 uma análise comparativa do *Liger* em relação aos sistemas de planejamento voltados a aplicações embarcadas da área espacial.

Tabela 1. Abordagens e estratégias de planejamento.

Trabalho	Planejamento	Estratégia	Linguagem	RT	TL	MPU	SPDI
Muscettola et al., (1998)	<i>Timeline</i> (CSP) Temporal	Planejamento em Lote ( <i>Batch</i> )	PDDL	IA	Sim	Não	Não
Knight et al., (2001)	<i>Timeline</i> (CSP) Temporal	Reparo Iterativo	Baseada na AML	IA	Sim	Não	Não
Kucinskis e Ferreira (2013)	<i>Timeline</i> (CSP) Temporal	Reparo Iterativo	ISIS	TP	Sim	Sim	Não
<i>Liger</i>	HTN e <i>Timelines</i>	Busca Progressiva	HML	TP	Sim	Sim	Não

RT = Representação Temporal, TL = *Timelines*, MPU = Modelo de Planejamento Unificado, SPDI = Sistema de Planejamento Independente de Domínio, IA = Intervalo de Allen, TP = *Time Points*, AML = ASPEN *Modeling Language*, HML = *Hybrid Modeling Language*, ISIS = *Internal State Inference Service*, PDDL = *Planning Domain Definition Language*.

### 2.3 Modelo Embarcado do Domínio Espacial

Para modelagem do domínio embarcado está em desenvolvimento uma linguagem denominada *Hybrid Modeling Language* (HML). O fato de ela ser dependente de domínio traz desempenho superior à abordagem independente de domínio (Jiang e Xu, 2017). Além dos objetivos, métodos, e tarefas inerentes ao planejador hierárquico, o domínio será composto por um motor de inferência baseado em *timelines*. Para isso, inspirou-se no *Internal State Inference Service* (ISIS - Kucinskis e Ferreira, 2010) também desenvolvido pelo INPE. Os conceitos desse serviço estão sendo incorporados à modelagem por decomposição hierárquica desta arquitetura. A composição básica do ISIS tem dois elementos centrais: uma descrição estática e outra comportamental do satélite, conforme a Figura 3. A parte inferior desta figura mostra o domínio hierárquico da HML.

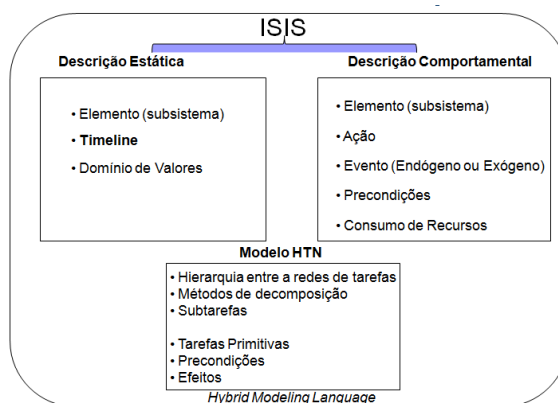


Figura 3. ISIS e suas propriedades principais estão sendo utilizadas para a construção da HML.





### 3. Resultados e Discussão

A fim de averiguar o comportamento da HARPIA diante de um ou mais cenários, é importante que se defina uma missão espacial para estudo de caso. Para isso, será utilizada a missão Amazonia-1 do INPE, cujo objetivo primordial é realizar a observação da Terra. Serão avaliados os seguintes cenários experimentais: planejar após perceber um novo objetivo, (como um pedido de aquisição de imagem), e solicitar reparo no plano após a identificação de conflitos, por exemplo, consumo de recurso fora do esperado. O objetivo é exercitar o funcionamento da arquitetura considerando-se o desdobramento das seguintes etapas: carregamento do plano, utilização do modelo do domínio espacial, verificação e execução do plano. A partir disso, podemos confrontar os resultados de desempenho com outros trabalhos que também divulgaram seus dados, como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2. Comparativo das características dos sistemas de planejamento**

Trabalho	Domínio de Aplicação	Tempo de Planejamento	Algoritmo de Busca	Uso da CPU	Processador
Muscettola et al., (RAX/1998)	Científica (Espaço Profundo)	De 30 minutos a 4 horas dependendo do tamanho do problema	Busca em profundidade com retrocesso	50%	PowerPC RAD6000 25 MHz
Chien et al., (CASPER/2005)	Observação da Terra	Na ordem de dezenas de minutos	Busca Local	100%	Mongoose V R3000 12 MHz 8 MIPS
Kucinskis e Ferreira (Letmedo/2013)	Observação da Terra	Para novos planos, ou modificações de baixo impacto: 1 a 3 minutos. Pior caso: 25 minutos	Busca Local	100%	ERC32 15 MHz 5.8 MIPS
Liger/2019	Observação da Terra	A ser avaliado	Busca Progressiva em Ordem Total	100%	ERC32 15 MHz 5.8 MIPS

### 4. Conclusão

Foi apresentada a arquitetura HARPIA em desenvolvimento no INPE que visa habilitar a autonomia operacional de satélites. O trabalho se concentrou na camada de decisão desta arquitetura, abordando uma estratégia híbrida para o planejamento embarcado de missão, que usa técnicas de planejamento hierárquico e temporal. A maior contribuição esperada deste trabalho é abordar mecanismos para controlar restrições temporais e de recursos em planejadores hierárquicos, tema pouco explorado na área de planejamento automatizado inclusive em domínios fora da área espacial.

### Referências

Amigoni, F., Gualandi, S., Menotti, D. and Sangiovanni, G. (2010) "A multiagent architecture for controlling the Palamede satellite," *Web Intelligence and Agent Systems*, vol. 8, no. 3, pages 269-289.



- Chien, S., Sherwood, R., Tran, D., Cichy, B., Rabideau, G., Castano, R. and Davis, A. (2005) "Using Autonomy Flight Software to Improve Science Return on Earth Observing One (EO-1)," *Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*, vol. 2, no. 4, pages 196-216.
- Fratini, S., Pecora, F. and Cesta, A. (2008) "Unifying Planning and Scheduling as Timelines in a Component-Based Perspective," *Archives of Control Sciences*, vol. 18, no. 2, pages 231-271.
- Ghallab, M., Nau, D. and Traverso, P. (2004). *Automated Planning - Theory and Practice*, 1st ed., San Francisco, USA : Elsevier.
- Jiang X. and Xu, R. (2017) "A Constraint-Programmed Planner for Deep Space Exploration Problems With Table Constraints," *IEEE Access*, vol. 5, pages 17258-17270.
- Knight, S., Rabideau, G., Chien, S., Engelhardt B. and Sherwood, R. (2001) "Casper: space exploration through continuous planning," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 16, no. 5, pages 70-75.
- Kucinskis, F. N. and Ferreira, M. G. V. (2010) "Taking the ECSS Autonomy Concepts One Step Further," in *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Space Operations*, pages 187-199.
- Kucinskis, F. N. and Ferreira, M. G. V. (2013). "Planning on-board satellites for the goal-based operations for space missions," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 4, p. 1110-1120, Jun. 2013.
- Mayer, M. C., Orlandini A. and Umbrico, A. (2016) "Planning and execution with flexible timelines: A formal account," *Acta Informatica*, vol. 53, no. 6–8, pages 649–680.
- Muscettola, N., Nayak, P., Pell, B. and Williams, C. (1998) "Remote Agent: to boldly go where no AI system has gone before," *Artificial Intelligence*, vol. 103, no. 1, pages 5-47.
- Nogueira, T. Fratini S. and Schilling, K. (2017) "Autonomously controlling flexible timelines: From domain-independent planning to robust execution," in *Proc. IEEE Aerospace Conference*, pages 1-15.
- Qi, C. et al., (2017) "Hierarchical task network planning with resources and temporal constraints," *Knowledge-Based Systems*, vol. 133, pages 17-32.
- Tipaldi, M. and Glielmo, L. (2018) "A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pages 3893-3905.
- Vilain, M. B. and Kautz, H. (1986) "Constraint propagation algorithms for temporal reasoning," in *Proc. fifth American Institute of Aeronautics and Astronautics*, pages 377-382.
- Zhang, Z. He, R. and Tan, Y. (2006) "An HTN-based mission planning model and algorithm for autonomous spacecraft," in *Proc. 1st Int. Sym. on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pages 4-26.