

## Uma Arquitetura de Automação de Operações Solo Multi-Agente

Adriana C. Bianco  
adcarnie@lac.inpe.br

Maurício G. V. Ferreira  
mauricio@ccs.inpe.br

José Demisio S. da Silva  
demisio@lac.inpe.br

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)  
Avenida dos Astronautas, 1758 – São José dos Campos – SP – Brasil*

### Resumo

*A redução de custos na área espacial é uma crescente necessidade que pode ser efetivada com a automatização do planejamento e da execução das operações espaciais de solo. Assim, propõe-se uma arquitetura de automação de operações solo multi-agente denominada MAGA (Multi-Agent Ground-operation Automation architecture). A arquitetura MAGA agrega agentes responsáveis pela automatização do planejamento e da execução de operações espaciais, gerenciando a alocação de recursos de solo para o rastreamento de um conjunto de satélites e planejando as suas operações de controle. Para o processo de planejamento, esta arquitetura considera a restrição temporal do período de visibilidade de um satélite, que pode ter o seu período de rastreamento reduzido devido a um conflito de tempo com a passagem de outro satélite. A arquitetura MAGA analisa se o período de rastreamento do satélite é suficiente para alcançar todos os objetivos da missão espacial e permite desconsiderar objetivos e subobjetivos de menor prioridade em caso de tempo insuficiente.*

**Palavras-chave:** sistema multi-agente, planejamento temporal, automação de operações espaciais, sistema de controle de satélites

### 1. Introdução

Na área espacial, existe um crescente interesse em automatizar o planejamento e a execução de operações espaciais com o objetivo de diminuir os custos relacionados ao controle de satélites em órbita. Essa preocupação pôde ser observada no último congresso de operações espaciais, denominado SpaceOps 2004 [Ercolani et al. 2004] [Ferri et al. 2004] [Harris et al. 2004] [Monham et al. 2004].

Seguindo essa tendência e necessidade, as idéias propostas neste trabalho visam manter o número das equipes de planejamento e de controle de operações espaciais frente aos projetos de novos satélites brasileiros.

A automação proposta está relacionada ao controle de múltiplos satélites e no conseqüente gerenciamento das restrições temporais e de compartilhamento de recursos de solo. O objetivo é identificar e tratar possíveis conflitos para o controle de satélites em órbita. Os recursos de solo consistem nas estações terrenas, que sediam antenas para a captura de sinais dos satélites.

Em sua órbita, um satélite se torna visível a uma estação terrena por um período de tempo limitado (janela de tempo), denominado período de visibilidade do satélite. Durante este período são enviados para o satélite (e também recebidos) um conjunto de operações/comandos com os propósitos de verificar o seu estado interno e de atingir os objetivos da missão espacial.

O termo missão espacial consiste na função a ser realizada por um satélite para gerar os produtos esperados do seu projeto e lançamento. Esses produtos esperados consistem nos objetivos da missão espacial e podem ser, por exemplo, serviços de comunicação e dados científicos.

Um conjunto de satélites pode compartilhar o uso de estações terrenas. Neste caso, o período de visibilidade de um satélite pode entrar em conflito com o período de visibilidade de outro satélite. Quando essa situação ocorre, a parte conflitante do período de visibilidade do satélite de menor prioridade deve ser cancelada. Esse cancelamento significa uma redução da janela de tempo durante a qual o satélite será rastreado pela estação terrena.

Considerando o fato de que um satélite pode ter seu período de rastreamento reduzido, levantou-se a

necessidade de readequar os objetivos da missão espacial à restrição de tempo do novo período de rastreo. A solução adotada para esta situação consiste em selecionar um subconjunto dos objetivos originais, desconsiderando os objetivos de menor prioridade.

A arquitetura MAGA – Multi-Agent Ground-Operation Automation Architecture identifica períodos de rastreo conflitantes e gera um plano de controle para cada satélite. Para a geração deste plano, a arquitetura verifica se há tempo suficiente para alcançar todos os objetivos da missão espacial e, se o tempo for insuficiente (quando o período de rastreo é reduzido), desconsidera objetivos e subobjetivos em ordem de prioridade.

Os objetivos de uma missão espacial são representados na área de Planejamento da Inteligência Artificial por objetivos de planejamento. A um objetivo de planejamento atribui-se uma prioridade de acordo com o seu nível de importância dentro do domínio de controle de satélites.

A arquitetura MAGA também permite a execução automatizada dos planos gerados. Essa automatização restringe o papel dos operadores de satélites humanos ao monitoramento da execução, possibilitando a esses profissionais controlar vários satélites em um mesmo período de tempo. A automação proposta visa a possibilidade de redirecionamento de operadores de satélites frente aos projetos de lançamento de novos satélites.

As próximas seções apresentam as principais características da arquitetura MAGA e as responsabilidades dos agentes que a constituem. A última seção apresenta as conclusões deste trabalho.

## 2. Características da Arquitetura MAGA

Segundo Ferber [Ferber 1999], em um sistema multi-agente as ações de planejamento podem ser divididas em três fases – construção de planos, coordenação de planos e a sua execução.

O primeiro passo consiste em gerar os planos. Essa tarefa pode ser delegada a um único agente ou ser particionada e distribuída entre um grupo de agentes. Essas duas formas de geração de planos em sistemas multi-agentes são denominadas planejamento centralizado e planejamento distribuído, respectivamente.

Na realidade, o termo planejamento distribuído pode estar vinculado tanto à forma de geração de planos como às formas de coordenação e de execução dos planos gerados [Weiss 1999]. A

arquitetura MAGA adota o termo planejamento distribuído considerando-se somente a fase de elaboração de planos.

Assim, essa arquitetura apresenta planejamento distribuído e coordenação e execução centralizadas. Essa decisão de projeto deve-se ao fato de que no ambiente de controle de missões espaciais o resultado do processo de planejamento deve ser integrado em um único plano final, a ser executado automaticamente.

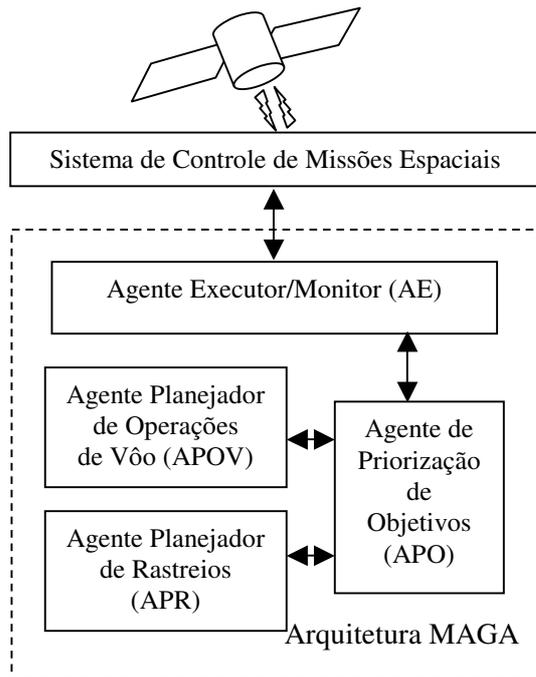
Assim, na arquitetura proposta a tarefa de planejamento é distribuída entre vários agentes de software, denominados agentes de planejamento ou agentes planejadores. Esses agentes são capazes de construir planos de ações para se alcançar objetivos [Russell e Norvig 2004], cooperando entre si para a obtenção do plano final.

A característica hierárquica presente na arquitetura MAGA deve-se ao fato de os agentes apresentarem uma relação de dependência funcional entre si. Os agentes planejadores são especialistas na geração de planos específicos do segmento de solo.

Esses planos se inter-relacionam e são combinados durante o processo de planejamento para a obtenção de um plano único final, pronto para ser executado por um agente responsável pela automatização da execução. A combinação dos planos gerados pelos agentes ocorre de forma seqüencial e ordenada, obedecendo a uma hierarquia entre os agentes planejadores.

## 3. Agentes da Arquitetura MAGA

A Figura 1 ilustra a arquitetura MAGA, apresentando a hierarquia de planejamento existente entre os agentes planejadores que constituem a arquitetura. Nessa hierarquia, o Agente Planejador de Rastreios no nível inferior disponibiliza seu plano para o Agente Planejador de Operações de Vôo no nível superior.



**Figura 1. Arquitetura de automação de operações solo multi-agente (MAGA)**

A seguir, apresentam-se as diferentes funcionalidades dos agentes que constituem a arquitetura.

**Agente Planejador de Rastreios (APR)** – responsável pela geração de Planos de Rastreios (PR), ou seja, planos que definem para uma determinada estação terrena quais satélites podem ser rastreados por essa estação, em qual ordem e com qual duração (período de rastreamento).

O Agente Planejador de Rastreios elimina o problema de rastreios de dois ou mais satélites com horários conflitantes em relação a uma mesma estação, encurtando ou cancelando o rastreo do satélite com menor prioridade.

**Agente Planejador de Operações de Vôo (APOV)** – responsável pela geração de Planos de Operações de Vôo (POV). O POV é um plano específico para cada satélite que contém seqüências de ações a serem executadas por um agente executor durante a sua passagem.

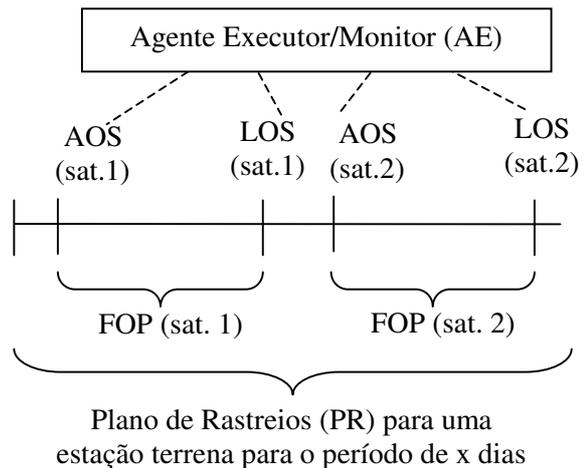
O APOV obtém do Agente Planejador de Rastreios os Planos de Rastreios de uma ou mais estações terrenas para um determinado satélite e gera um plano de vôo ajustável ao período de rastreo pré-

determinado, considerando os horários de início e fim de passagem do satélite.

**Agente Executor/Monitor (AE)** – responsável pela execução automatizada de um POV. Este agente executa as ações de um POV uma a uma e monitora o estado do ambiente de execução por meio das informações atuais do estado interno do satélite em órbita. Essas informações, fornecidas pelo satélite às estações terrenas, são denominadas telemetrias.

A Figura 2 abaixo mostra como os planos gerados pelos agentes planejadores da arquitetura MAGA se inter-relacionam, obedecendo à hierarquia existente entre eles.

As siglas AOS e LOS significam, respectivamente: AOS – *Acquisition of Signal* (aquisição de sinal, ou seja, início de passagem do satélite sobre uma estação terrena) e LOS – *Loss of Signal* (término de aquisição de sinal, ou seja, fim de passagem do satélite).



**Figura 2. Relacionamento hierárquico entre os planos da arquitetura MAGA**

**Agente de Priorização de Objetivos (APO)** – responsável por gerenciar as restrições temporais, assumindo que as ações de planejamento possuem duração e os objetivos apresentam prioridades.

Durante a fase de planejamento, o Agente Planejador de Operações de Vôo estima as durações das ações que contribuem para atingir cada objetivo, gerando um plano temporal. Portanto, um plano temporal consiste em uma seqüência ordenada de ações com suas durações respectivas para alcançar um conjunto de objetivos (e subobjetivos).

Uma vez gerado o Plano de Operações de Vôo, o Agente de Priorização de Objetivos pode verificar a duração total do plano. O objetivo dessa verificação consiste em verificar se o plano gerado pode ser executado dentro do período de rastreamento do satélite considerado.

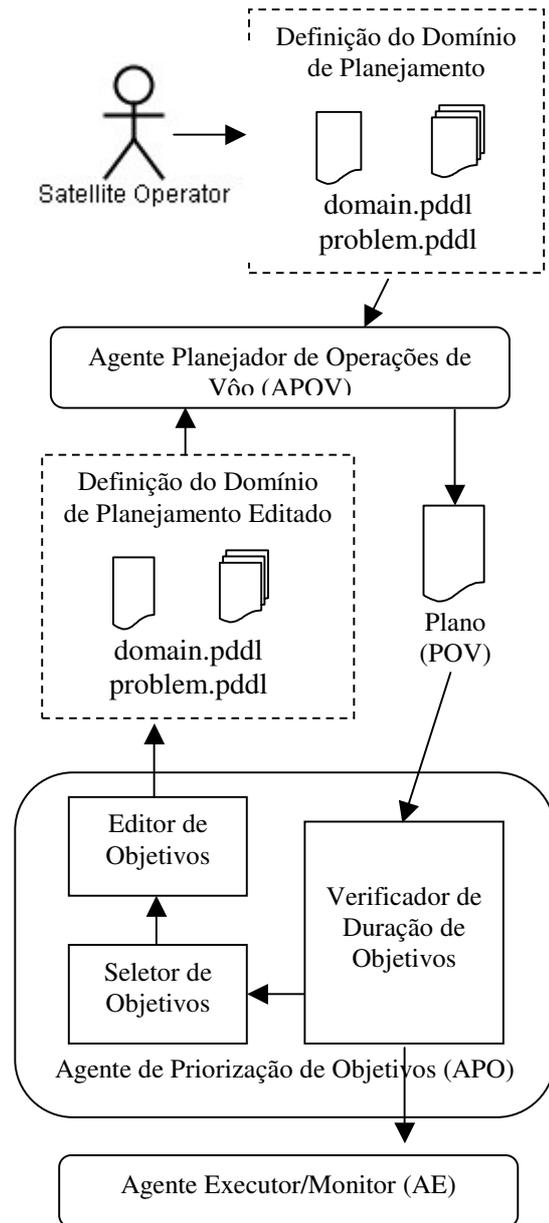
Assim, este agente verifica se a duração do período de rastreamento é suficiente para que todos os objetivos do plano sejam alcançados. A atuação desse agente é particularmente útil quando o período de rastreamento de um satélite tiver sido reduzido (pelo Agente Planejador de Rastreamentos) para evitar intersecção de passagem com outro satélite. Neste caso, o período de rastreamento geralmente não é suficiente para que todos os objetivos da missão sejam alcançados.

Como solução a esta restrição de tempo, o Agente de Priorização de Objetivos atribui prioridades aos objetivos e subobjetivos a fim de considerar somente os objetivos de maior relevância para o replanejamento do Plano de Operações de Vôo. Assim, somente os objetivos de maior relevância são fornecidos ao processo de planejamento de forma que as ações de planejamento possam se ajustar ao período de rastreamento reduzido.

Para a implementação dessa solução, atribui-se a cada objetivo uma prioridade, que consiste em um valor simbólico. Este valor retrata a necessidade de execução do objetivo durante uma passagem do satélite e pode ser alterado de uma passagem para outra a fim de retratar as mudanças no ambiente de controle de satélites.

Além de retratar mudanças, o planejamento considerando prioridades evita que, no caso de tempo insuficiente, o Agente Planejador de Operações de Vôo elimine ações que colocariam em risco a manutenção do satélite em órbita.

A Figura 3 apresenta o Agente de Priorização de Objetivos inserido na arquitetura MAGA.



**Figura 3. Agente de Priorização de Objetivos e a arquitetura MAGA**

O Agente de Priorização de Objetivos é constituído pelos seguintes elementos:

- Verificador de Duração de Objetivos, verifica se é possível alcançar todos os objetivos do Plano de Operações de Vôo dentro do período de rastreamento do satélite. Caso a duração do período de rastreamento seja suficiente, o Plano é executado pelo Agente Executor/Monitor. Caso contrário, o Agente Planejador replaneja desconsiderando, em ordem de prioridade, objetivos ou subobjetivos da Definição do Domínio de Planejamento;

- Seletor de Objetivos, seleciona o objetivo ou subobjetivo de menor prioridade para ser eliminado da Definição do Domínio de Planejamento;

- Editor de Objetivos, remove o objetivo ou subobjetivo de menor prioridade selecionado anteriormente editando a Definição do Domínio de Planejamento (arquivos pddl).

A possibilidade de desconsiderar objetivos e subobjetivos torna o Agente Planejador de Operações de Vôo capaz de replanejar iterativamente para gerar um plano que se ajuste ao período de rastreamento do satélite.

#### 4. Conclusões

Este trabalho propõe uma arquitetura multi-agente de automação de planejamento e execução para o domínio de controle de vários satélites. A arquitetura MAGA automaticamente planeja as operações espaciais a serem enviadas e recebidas de um satélite, considerando a restrição de tempo do seu período de rastreamento, e automaticamente executa os planos gerados.

Esta arquitetura soluciona o problema de satélites com períodos de rastreamento de horários conflitantes. Quando um conjunto de satélites compartilha uma mesma estação solo, o período de visibilidade de um satélite pode se intersectar com o período de visibilidade de outro satélite.

Neste caso, o Agente Planejador de Rastreamentos reduz o período de rastreamento do satélite de menor prioridade. Essa redução no período de rastreamento significa que o Agente Planejador de Operações de Vôo não terá tempo suficiente para alcançar todos os objetivos originais para os quais ele gerou previamente um plano.

Para solucionar este problema, o Agente de Priorização de Objetivos iterativamente seleciona objetivos e subobjetivos para serem desconsiderados obedecendo ao laço – selecionar objetivo por menor prioridade, remover objetivo da Definição do Domínio de Planejamento, replanejar, verificar nova duração do plano em relação ao período de rastreamento do satélite.

As prioridades dos objetivos de uma missão espacial são definidas pelos operadores de satélites e são configuráveis de forma a retratar os requisitos do próximo rastreamento. Assim, os objetivos desconsiderados para a geração de um plano de controle podem ter suas prioridades aumentadas na próxima geração do plano (próximo rastreamento do satélite). Isso possibilita configurar a tarefa de planejamento para refletir os requisitos atuais de rastreamentos de satélites.

Além desse benefício, o mecanismo de raciocínio do Agente de Priorização de Objetivos permite ajustar os objetivos mais relevantes ao período de rastreamento reduzido de um satélite, o que evita o risco de acidentalmente desconsiderar operações cruciais ao controle de satélites.

Em relação ao aspecto de automação de execução da arquitetura MAGA, o objetivo não é eliminar a necessidade de trabalho humano, mas sim manter a quantidade de operadores de satélites frente aos projetos de lançamento de novos satélites.

Adotando-se os conceitos dessa arquitetura, espera-se reduzir os custos operacionais de controle de satélites e aumentar a configurabilidade da tarefa de planejamento de operações espaciais, facilitando as funções das equipes de planejamento e de operação de missões.

#### 5. Referências

- [1] Ercolani, A.; Ferri, P.; Simonic, A.; Kowalczyk, A. & Ulriksen, T., "Operations Automation for Rosetta Mission", The Space Operations 2004 Conference, Montreal, Canada, 2004.
- [2] Ferber, J. *Multi-Agent Systems – An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, London, 1999.
- [3] Ferri, P.; Pecchioli, M. & Pena, A., "Introducing Automation in Ground Segment Operations", The Space Operations 2004 Conference, Montreal, Canada, 2004.
- [4] Harris, W.; Blake, R.; Woods, D. & Thompson, R., "Mission Planning for Constellations", The Space Operations 2002 Conference, Houston, Texas, 2002.
- [5] Monham, A. & Rudolph, A., "Controlled Approach to Automated Operations", The Space Operations 2004 Conference, Montreal, Canada, 2004.
- [6] Russell, S. & Norvig, P. *Inteligência Artificial*, Editora Campus, 2a. edição, 2004.
- [7] Weiss, G. *Multiagent Systems – a Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence*, The MIT Press, 1999.