



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12911-PUD/169

UMA ARQUITETURA DE AUTOMAÇÃO DE OPERAÇÕES SOLO MULTI-AGENTE

Adriana Carniello
Mauricio Gonçalves Vieira Ferreira
José Demísio Simões da Silva

RESUMO

A redução de custos na área espacial é uma crescente necessidade. Uma forma de efetivar tal redução consiste em automatizar as operações das missões espaciais dentro do segmento de solo. Assim, propõe-se uma arquitetura de automação de operações solo multi-agente denominada AOSMA. A arquitetura AOSMA agrega agentes responsáveis pelo planejamento automático de missões e pela execução automatizada de operações. Automatizando-se o segmento de solo, pode-se reduzir custos associados às equipes de planejamento e de controle. Dentro desta proposta, define-se um gerenciador temporal que permite a um dos agentes da arquitetura AOSMA tratar restrições temporais durante a geração de planos. Este gerenciador estabelece uma análise de tempo para saber se há tempo suficiente para atingir todos os objetivos de uma missão e permite adequá-los à restrição de tempo, se necessário.

Palavras-chave: sistema multi-agente, planejamento, sistema espacial, plano de voo, automação de operações

ABSTRACT

Reducing the costs of space mission operations is an increasing demand which may be achieved by automating the space mission ground segment operations. This work proposes a multi-agent ground-operation automation architecture named AOSMA. This architecture aggregates agents responsible for automating mission planning and operation execution. By automating the ground segment, it is possible to minimize costs related to the planning and the controlling staffs. This work introduces a new temporal planning manager that allows an agent of the AOSMA architecture to deal with temporal restrictions during plan generation. This temporal manager analyzes whether there is sufficient time to achieve all mission goals and allows goal reduction in case of insufficient time.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	9
CAPÍTULO 2 -	15
TECNOLOGIA DE AGENTES	15
2.1- Definição	15
2.2 - Ambientes de Tarefas de Agentes	16
2.3 - Agente Planejador, Linguagem e Ambiente	19
2.4 - Planejamento em Ambientes Clássicos	21
2.5 - Planejamento em Ambientes Não-Clássicos	23
2.6 - Planejamento Distribuído em Ambientes Multi-Agentes	24
CAPÍTULO 3 -	27
AMBIENTE DE CONTROLE DE MISSÕES ESPACIAIS	27
3.1 - Definição de um Ambiente de Controle de Missões Espaciais	27
3.2 - Planos de Controle de Operações de Missões Espaciais	30
3.3 - Equipes de Operação e de Suporte	32
CAPÍTULO 4 -	35
PLANEJAMENTO E AUTOMATIZAÇÃO DE OPERAÇÕES ESPACIAIS	35
4.1 - Motivação e Tendências para a Automatização	35
4.2 - Automatização do Segmento de Solo	37
4.2.1 - Solução do JPL para a NASA	37
4.2.2 - Solução SciSys em Parceria com o ESTEC/ESA	38
4.2.3 - Solução do ESOC/ESA	39
4.3 - Análise das Soluções Atuais	41
CAPÍTULO 5 -	43
PROPOSTA	43
5.1 - Arquitetura AOSMA	43
5.2 - Gerenciador de Planejamento Temporal	47
5.3 - Funcionamento da Arquitetura AOSMA	49
5.4 - Atividades para a Realização da Proposta	53
CAPÍTULO 6 -	55
CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No contexto de sistemas espaciais existem duas divisões básicas – o segmento espacial (satélite) e o segmento de solo (ECSS-E-70 Part 1A, 2000). No segmento de solo encontram-se os recursos humanos, que executam tarefas de operação e de preparação de dados de missões, e o sistema de solo.

O sistema de solo é constituído por elementos de infra-estrutura de solo usados nas atividades de preparação de operações de missões espaciais e de condução dessas operações. Dentre esses elementos encontram-se o sistema de controle de operações (SCO) e o sistema de controle de carga útil (*payload*) (SCCU).

O SCO oferece suporte ao planejamento, monitoramento e controle das operações de um satélite. O SCCU apresenta as mesmas funcionalidades do SCO, mas volta-se para os elementos de carga útil do satélite. Os elementos de carga útil consistem nos elementos que constituem o objetivo da missão espacial.

Considerando as atuais restrições orçamentárias para a área espacial, este trabalho propõe-se a reduzir os custos operacionais relacionados à manutenção de satélites em órbita e a aumentar a confiabilidade da execução de operações espaciais por meio da redução da probabilidade de ocorrência de falhas humanas. Identificou-se que automatizando-se o segmento de solo é possível reduzir gastos associados às equipes de planejamento e de operação de missões espaciais.

A automatização desse segmento é facilitada e justificada pela presença de atividades de rotina dependentes de atuação humana. A automação de processos diários e repetitivos que requerem esforço humano consiste em uma solução para a redução de custos, além de aumentar a motivação humana frente à tarefas menos repetitivas.

A automatização do segmento de solo, além de tratar o problema do alto custo de manutenção de satélites em órbita, permite tratar dois outros problemas: (1) queda de confiabilidade na execução de operações espaciais devido à probabilidade de ocorrência

de falhas humanas; e (2) as limitações de reconfigurabilidade da tarefa de planejamento de missões espaciais e a falta de interfaces de software que facilitem a reconfiguração do processo de planejamento.

Assim, com os objetivos de reduzir custos operacionais, de aumentar a confiabilidade da execução de operações espaciais e de facilitar a reconfigurabilidade dos sistemas de planejamento de missões espaciais, a automatização proposta neste trabalho centra a concepção dos sistemas de solo SCO e SCCU em dois aspectos: (1) automatizar a execução das operações espaciais; e (2) tornar o planejamento de operações espaciais uma tarefa facilmente reconfigurável.

Propõe-se que esses dois aspectos sejam implementados por meio de agentes de software inseridos em uma arquitetura multi-agente hierárquica de planejamento distribuído denominada AOSMA – Arquitetura de Automação de Operações Solo Multi-Agente. A arquitetura AOSMA concebe a implementação dos aspectos citados acima por meio das seguintes funcionalidades:

- Planejamento automático *off-line* das operações de missões. Essa funcionalidade permite conferir reconfigurabilidade à tarefa de planejamento de missões espaciais de forma a aumentar a flexibilidade da realização dessa tarefa, o que facilita a geração de planos para várias missões espaciais. Obtém-se reconfigurabilidade na tarefa de planejamento adotando-se agentes especialistas, que geram planos de ações segundo uma representação bem definida do domínio do problema. Assim, o planejamento automático *off-line* é realizado por agentes especialistas, que consideram restrições de tempo e de recursos para gerar planos que gerenciam: (1) os satélites em órbita (plano de voo e plano de *payload*); e (2) os recursos de solo para atender à várias missões (plano de rastreios e plano de configuração de estação terrena). Esses planos são executados em solo, exceto o plano de *payload*;

- Execução automatizada de planos. Essa funcionalidade permite reduzir custos operacionais por meio da redução de gastos com recursos humanos, além de aumentar a confiabilidade da execução de operações espaciais, evitando-se possíveis falhas humanas. Para realizar a execução automática de planos disponibiliza-se as funções de

monitoramento e de controle do sistema de controle de satélites, geralmente acessíveis somente via interface homem-máquina, para um sistema de automação (agente monitor e executor).

Na arquitetura AOSMA, a tarefa de planejamento será distribuída entre vários agentes de software inteligentes, denominados agentes de planejamento ou agentes planejadores, que são capazes de construir planos de ações para se alcançar objetivos (Russell e Norvig, 1995). Esses agentes planejadores cooperam entre si para a obtenção de um único plano final, obedecendo à uma hierarquia inter-agentes pré-estabelecida.

A necessidade de planejamento de operações espaciais para várias missões que compartilham recursos de solo, como estações terrenas e redes de comunicação de dados, motivou a introdução de um gerenciador de planejamento temporal. O gerenciador de planejamento temporal proposto é empregado como mecanismo de raciocínio por um dos agentes planejadores da arquitetura AOSMA.

Este gerenciador de planejamento soluciona diretamente o problema de geração de planos de operações para satélites cujos períodos de rastreo tenham sido reduzidos. Um período de rastreo consiste no intervalo de tempo em que um satélite se comunica com uma estação terrena. Um período de rastreo de um satélite é reduzido no caso deste período se intersectar com o período de rastreo de outro satélite em relação a uma mesma estação.

O gerenciador de planejamento temporal define os objetivos e as ações a serem consideradas no processo de planejamento a fim de gerar planos que cumpram, no caso de um período de rastreo reduzido, apenas os principais propósitos do rastreo considerado.

Este trabalho segue com a apresentação do Capítulo 2, no qual introduz-se as definições de agentes de software e agentes de planejamento, empregados na arquitetura AOSMA. Apresentam-se também os tipos de ambientes de agentes e um conjunto de técnicas de planejamento adequadas a esses ambientes. A apresentação dos tipos de ambientes e das

técnicas a eles relacionadas faz-se necessário para analisar e classificar o ambiente de controle de missões espaciais.

O Capítulo 3 apresenta as principais características do ambiente de controle de missões espaciais, enfatizando o segmento de solo e os planos necessários ao seu controle. No Capítulo 4 apresentam-se os trabalhos relacionados à esta proposta de trabalho e analisa-se as soluções apresentadas.

No Capítulo 5 apresenta-se em detalhes a proposta de trabalho de tese, definindo-se a arquitetura AOSMA e o gerenciador de planejamento temporal. O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA DE AGENTES

2.1 Definição

A definição de agente não é consensual (Lieberman, 1997). O maior problema na definição do termo agente é que se trata de um vocábulo extensamente usado por diversos pesquisadores que trabalham em áreas estreitamente relacionadas (Sycara, 1998). Assim, existem várias definições vinculadas à pesquisadores empenhados no estudo e no desenvolvimento de agentes. A seguir, apresentam-se algumas dessas definições.

Para Russell e Norvig (1995), um agente pode ser visto como algo que observa o ambiente por meio de sensores e age nesse ambiente por intermédio de atuadores. Para exemplificar esse conceito de agente, pode-se fazer um comparativo entre agentes humanos, agentes robôs e agentes de software.

Um agente humano possui olhos, ouvidos e outros órgãos que funcionam como sensores no ambiente, além disso possui mãos, pernas, boca e outras partes do corpo que agem como atuadores nesse ambiente. Um agente robô, por sua vez, pode possuir câmeras de vídeo e outros sensores para observar o ambiente, e pode ter vários motores como atuadores. Um agente de software recebe seqüências de digitações, conteúdo de arquivos e/ou pacotes de rede como entradas sensórias e atua sobre o ambiente exibindo algo na tela, gravando arquivos e/ou enviando pacotes de rede.

Em termos matemáticos, Russell e Norvig afirmam que o comportamento de um agente é descrito por uma função que mapeia qualquer seqüência de percepções específica para uma ação. Para um agente de software, essa função é implementada por um programa de agente, que consiste em uma implementação concreta.

Maes (1995) considera que agentes são sistemas computacionais que habitam em algum ambiente dinâmico e complexo, percebem e agem de forma autônoma nesse ambiente, e fazendo isso, realizam um conjunto de metas ou tarefas para as quais foram projetados.

Uma noção diferenciada para agentes é atribuída à IBM, segundo Gilbert (1997). Os agentes de software são recursos pessoais, focando-se na funcionalidade e não no ambiente. Um agente inteligente é um programa que ajuda as pessoas e atua em seu benefício, suporte, interesse, defesa e apoio.

Decorrente desta noção, agentes de software podem trabalhar representando pessoas, as quais lhe delegam responsabilidades. Os agentes de software podem lembrar as pessoas de coisas que elas podem esquecer, resumir inteligentemente dados complexos, aprender sobre os interesses das pessoas e fazer recomendações a elas.

Wooldridge e Jennings (1995) sugerem considerar dois enfoques na conceituação de agentes: a noção fraca e a noção forte de agente. Para a noção fraca, o termo agente é empregado em sua forma mais geral, denotando uma entidade baseada em *hardware* ou em *software* (mais freqüente).

A noção forte de agentes considera especialmente a área da inteligência artificial, onde o termo agente possui um significado mais específico e forte do que o apresentado anteriormente. O agente é entendido como sendo uma entidade que, além das propriedades apresentadas anteriormente, é implementada empregando conceitos mais usualmente aplicados a seres humanos e caracterizados por estados mentais, tais como crença, intenção e compromisso.

2.2 Ambientes de Tarefas de Agentes

Em relação ao projeto de agentes de software, deve-se primeiramente especificar o seu ambiente de tarefas. Um ambiente de tarefas, segundo Russell e Norvig (2004), consiste em um problema para o qual o agente apresenta uma solução.

Um ambiente de tarefa de um agente é constituído pela especificação da medida de desempenho, do ambiente, dos atuadores e dos sensores do agente. Uma medida de desempenho consiste em um critério que mede o sucesso do comportamento do agente. Quando um agente é inserido em um ambiente, ele gera uma seqüência de ações de acordo com as percepções que recebe. Essa seqüência de ações faz o ambiente passar por uma seqüência de estados. A medida de desempenho, geralmente imposta pelo projetista do agente, analisa se essa seqüência é desejável ou não.

Quanto ao ambiente, Russell e Norvig (2004) identificam seis propriedades que permitem dividir os ambientes de tarefas em categorias. Essas categorias, apresentadas a seguir, determinam o projeto apropriado de agentes.

Completamente observável versus parcialmente observável – um ambiente é completamente observável se os sensores do agente permitem acesso ao estado completo do ambiente. Os sensores devem ser capazes de detectar todos os aspectos que são relevantes para a escolha das ações. Em ambientes com essa propriedade o agente não precisa manter um estado interno para ser capaz de agir. Um ambiente é parcialmente observável devido a sensores imprecisos ou porque partes do estado estão ausentes nos dados dos sensores.

Determinístico versus estocástico – um ambiente de tarefa é considerado determinístico se seu próximo estado é completamente determinado pelo estado atual e pela ação executada pelo agente. Caso contrário, ele é estocástico.

Episódico versus seqüencial – em um ambiente de tarefa episódico, a escolha da ação em cada episódio só depende do próprio episódio e o agente não precisa pensar para frente. Cada episódio consiste na percepção do agente, e depois na execução de uma única ação. Em um ambiente seqüencial, a decisão atual pode afetar todas as decisões futuras.

Estático versus dinâmico – o ambiente de tarefa é dinâmico se o ambiente puder se alterar enquanto o agente está deliberando. Em um ambiente estático, o agente não

precisa continuar a observar o mundo enquanto está decidindo sobre a realização de uma ação e não precisa se preocupar com a passagem do tempo.

Discreto versus contínuo – a distinção entre discreto e contínuo pode se aplicar ao estado do ambiente, ao modo como o tempo é tratado, e às percepções e ações do agente. Por exemplo, um jogo de xadrez é considerado como um ambiente de tarefas discreto, pois apresenta um número finito de estados distintos e um conjunto discreto (valores separados) de percepções e ações. Dirigir um táxi é considerado como um ambiente de tarefas contínuo, pois o estado e o tempo são contínuos, ou seja, ininterruptos. A velocidade e a posição do táxi e dos outros veículos passam por um intervalo de valores contínuos ao longo do tempo. As ações de dirigir um táxi também são contínuas considerando os ângulos de rotação do volante.

Agente único versus multi-agente – a distinção entre esses dois tipos está relacionada à quantidade de agentes em um ambiente. Um agente que resolve um problema sozinho encontra-se em um ambiente de agente único. Em um ambiente multi-agente existem vários agentes que se relacionam entre si.

Em um ambiente de planejamento multi-agente, surgem outras questões que devem ser consideradas: esses ambientes podem ser cooperativos ou competitivos. A cooperação entre agentes ocorre quando estes possuem objetivos em conjunto, enquanto que a competição assume objetivos conflitantes. Os planos gerados para ambientes multi-agente cooperativos são planos conjuntos, enquanto que os planos para ambientes competitivos são planos que visam o sucesso individual dos agentes.

A combinação das propriedades listadas acima em um ambiente de tarefas determina o grau de dificuldade na implementação de um agente. O ambiente de tarefas mais complexo de se tratar consiste no ambiente que agrega as propriedades parcialmente observável, estocástico, seqüencial, dinâmico, contínuo e multi-agente.

2.3 Agente Planejador, Linguagem e Ambiente

Um agente de software pode ser classificado de acordo com a sua funcionalidade principal. Um agente de software capaz de construir planos de ação para um determinado problema é denominado agente de planejamento ou agente planejador.

Dado um objetivo, um agente planejador é capaz de construir um plano de ação para um determinado problema a partir de suas percepções do ambiente, executar essas ações e avaliar a satisfação do objetivo, modificando o seu plano de ação, se necessário.

O problema de planejamento é tratado como um problema de inferência lógica, que utiliza lógica de primeira ordem como linguagem de representação. Dessa forma, o agente planejador representa o ambiente em que opera e é capaz de deduzir quais ações executar.

A representação de problemas de planejamento inclui a representação de estados, ações e objetivos e deve tornar possível a criação de algoritmos de planejamento que considerem a estrutura lógica do problema em análise.

Uma abordagem clássica de planejadores consiste em descrever os seus elementos de acordo com uma linguagem denominada *Stanford Research Institute Problem Solver* (STRIPS). A linguagem STRIPS, desenvolvida no começo dos anos setenta por Fikes e Nilson (1971), é uma linguagem básica de representação de planejadores clássicos, constituída por representações de estados, de objetivos e de ações (Russell e Norvig, 2004).

Um estado, assim como um objetivo, é representado como uma conjunção de literais positivos. Um estado proposicional s satisfaz a um objetivo g se s contém todos os átomos em g (e possivelmente outros). Por exemplo, o estado $Em(Avião1, Florianópolis) \wedge Em(Avião2, Curitiba) \wedge Em(Avião3, Porto Alegre)$ satisfaz ao objetivo $Em(Avião1, Florianópolis) \wedge Em(Avião2, Curitiba)$. Um objetivo pode conter variáveis, como por exemplo o objetivo de estar em um loja que vende leite: $Em(x) \wedge Vende(x, Leite)$.

Uma ação é especificada em termos das pré-condições que devem ser válidas para que a ação seja executada e dos efeitos resultantes de sua execução. Por exemplo, uma ação equivalente a voar em um avião de um local para outro pode ser representada da seguinte forma:

Ação(Voar(a, de, para),

PRECOND: $Em(a, de) \wedge Avião(a) \wedge Aeroporto(de) \wedge Aeroporto(para)$

EFEITO: $\neg Em(a, de) \wedge Em(a, para)$)

Essa forma de representação é denominada esquema de ação, pois representa várias ações diferentes que podem ser derivadas pela instanciação das variáveis com constantes diferentes. Em geral, um esquema de ação é constituído de três partes:

- O nome da ação e uma lista de parâmetros. Por exemplo, Voar(a, de, para) identificam a ação;

- A pré-condição é uma conjunção de literais positivos que declaram o que deve ser verdadeiro em um estado antes da ação ser executada. Quaisquer variáveis na pré-condição também devem aparecer na lista de parâmetros da ação;

- O efeito é uma conjunção de literais positivos ou negativos que descrevem como o estado se altera quando a ação é executada. As variáveis no efeito também devem aparecer na lista de parâmetros da ação.

Na realidade, a linguagem STRIPS é uma linguagem para problemas de planejamento básica, visto que assume diversas restrições com o objetivo de tornar os algoritmos de planejamento mais simples e mais eficientes. Essas restrições, listadas em (Russell e Norvig, 2004), torna a linguagem insuficientemente expressiva para alguns domínios reais. Como resultado, foram desenvolvidas muitas variantes dessa linguagem, como, por exemplo, a linguagem *Action Description Language* (ADL).

Com o objetivo de criar um modelo comum de testes para que os algoritmos de planejamento pudessem ser comparados entre si, desenvolveu-se uma linguagem padrão

denominada Linguagem de Definição de Domínio de Planejamento ou PDDL – *Planning Domain Definition Language*.

A PDDL é uma linguagem de descrição de domínios em planejamento automático que permite à comunidade de Planejamento de Inteligência Artificial trocar problemas de *benchmark* e comparar resultados. A PDDL inclui sublinguagens correspondentes à STRIPS, à ADL e a outras linguagens. A linguagem PDDL tornou-se a linguagem padrão nas competições bi-anuais de planejamento automático, conhecidas por IPC – *International Planning Competition*.

Um agente planejador representa o ambiente de tarefas, ou seja, o problema para o qual gera um plano como solução, adotando uma das linguagens de descrição de domínio introduzidas acima. Um ambiente de planejamento pode ser classificado de acordo com as propriedades que o seu ambiente de tarefas apresenta. Assim, de acordo com as propriedades apresentadas na Seção 2.2, um ambiente de planejamento pode ser classificado como clássico e não-clássico (Russell e Norvig, 2004).

Um ambiente de planejamento clássico é um ambiente completamente observável, determinístico e estático, enquanto um ambiente de planejamento não-clássico é um ambiente parcialmente observável e/ou estocástico. Para cada tipo de ambiente de planejamento existe um conjunto diferente de algoritmos.

2.4 Planejamento em Ambientes Clássicos

Para problemas de planejamento clássico existem diversas representações e diversas abordagens algorítmicas para resolvê-los, dentre as quais:

- Algoritmo de busca no espaço de estados – opera no sentido para frente (progressão) a partir do estado inicial ou no sentido para trás (regressão) a partir do objetivo;
- Algoritmo de planejamento de ordem parcial (POP) – não se compromete com uma seqüência totalmente ordenada de ações. Esse tipo de algoritmo funciona no

sentido para trás a partir do objetivo, acrescentando ações ao plano para alcançar cada subobjetivo. Aplica-se o algoritmo POP de forma efetiva em problemas onde a abordagem dividir e conquistar pode ser empregada;

- Algoritmo planejamento-em-grafo – constrói um grafo de forma incremental, partindo do estado inicial. Nesse grafo, cada camada contém um superconjunto de todos os literais ou ações que poderiam ocorrer em um certo período de tempo e codifica relações de exclusão mútua entre literais ou ações que não podem ocorrer concomitantemente. Esse grafo pode ser posteriormente processado pelo algoritmo planejamento-em-grafo, utilizando busca para trás, para extrair um plano.

Para Russell e Norvig (2004) cada uma das principais abordagens de planejamento tem seus partidários e ainda não existe um consenso sobre qual abordagem é a melhor.

No entanto, neste trabalho optou-se pela aplicação do algoritmo de planejamento de ordem parcial por diversas razões. A busca para frente e a busca para trás no espaço de estados são formas específicas de busca em planos totalmente ordenados. Essas buscas não consideram a decomposição de um problema (objetivo) em subobjetivos. Ao invés de atuarem sobre cada subproblema separadamente, decidem como definir seqüências de ações para alcançar todos os subproblemas.

Um planejador de ordem parcial consegue atuar sobre vários subobjetivos de forma independente, resolvendo-os como um conjunto de subplanos, que são posteriormente combinados. Assim, esse tipo de planejador é capaz de manipular duas subseqüências de ações, que alcançam elementos distintos da conjunção do objetivo, sem o compromisso de uma ação em uma seqüência estar antes ou depois de uma ação da outra seqüência.

Com isso, esse tipo de planejador apresenta a vantagem de flexibilidade na ordem em que elabora o plano. O planejador pode trabalhar primeiro em decisões consideradas mais importantes ou óbvias, não sendo forçado a atuar em etapas dispostas em ordem cronológica.

Além disso, os planos gerados por planejadores de ordem parcial apresentam um maior grau de flexibilidade de execução em relação aos planos produzidos por planejadores de busca de estados e baseados em grafos (Coddington, 2002).

2.5 Planejamento em Ambientes Não-Clássicos

O conjunto de técnicas de planejamento descrito acima aplica-se a ambientes de planejamento clássicos, nos quais um agente pode primeiro planejar e depois executar inteiramente o plano.

Em um ambiente não-clássico, o agente não pode simplesmente executar o plano inteiro. Nesse tipo de ambiente, o agente deve usar suas percepções para descobrir o que está acontecendo enquanto o plano é executado.

As técnicas de planejamento apresentadas a seguir estão voltadas para ambientes não-clássicos (Russell e Norvig, 2004):

- Planejamento condicional – esta técnica lida com a incerteza por meio da verificação do que realmente está acontecendo no ambiente em pontos pré-determinados no plano. Um agente planejador condicional constrói no plano, em tempo de planejamento, ações condicionais que verificam o estado do ambiente, em tempo de execução, com o objetivo de decidir qual a próxima ação a ser executada. Uma ação condicional é uma ação que representa um ponto de ramificação no plano final;

- Monitoramento de execução e replanejamento – um agente replanejador com monitoração de execução trata o caso em que uma parte de um plano não pode ser executada devido às pré-condições de suas ações não serem satisfeitas pelo estado atual do ambiente. Ele contorna essa situação replanejando, ou seja, construindo um novo plano para atingir o objetivo (Russell e Norvig, 1995). Por motivo de economia de tempo, o replanejamento é realizado reparando-se o plano antigo, com o objetivo de encontrar um caminho do estado inesperado atual de volta para a seqüência normal do plano (Russell e Norvig, 2004). O agente replanejador primeiro constrói todo o plano e depois executa-o, monitorando a execução;

- Planejamento contínuo – um agente planejador contínuo realiza o planejamento e o monitoramento de execução de forma contínua, alternando-os à medida em que as ações de um plano se tornam prontas para serem executadas. O agente planejador contínuo constrói um plano de maneira incremental, obedecendo ao ciclo – perceber o ambiente, remover falha e executar ações. Após a execução de uma ação do plano, o novo estado do ambiente é refletido na ação *Iniciar* do plano, que é sempre usada para se obter o estado atual do ambiente (Russell e Norvig, 1995).

As três técnicas apresentadas acima representam um progresso para o projeto de agentes planejadores pois possibilitam o tratamento de informações incompletas e incorretas. Adotando-se o planejamento condicional, pode-se lidar com informações incompletas obtendo mais informações do ambiente durante a execução do plano. As informações incorretas resultam em pré-condições não-satisfeitas para as ações de um plano. O monitoramento de execução detecta essas violações de pré-condições que não permitem que o plano seja bem sucedido.

Neste trabalho, os agentes propostos adotam a técnica de planejamento condicional, utilizando o plano de ordem parcial como representação. A utilização do planejamento condicional tem como objetivo gerar planos para um conjunto finito de circunstâncias possíveis, considerando que o ambiente de controle de missões espaciais pode ser classificado como um ambiente não-determinístico limitado.

Em um ambiente não-determinístico limitado, um agente planejador conhece todos os estados possíveis de operação, mas não sabe a priori qual o estado resultante da execução de uma determinada ação. Para lidar com a falta dessa informação, o agente planejador insere ações condicionais no plano para verificar, em tempo de execução, o estado resultante da execução de uma ação.

2.6 Planejamento Distribuído em Ambientes Multi-Agentes

Em um ambiente multi-agente as ações de planejamento podem ser divididas em três fases – construção de planos, coordenação de planos e a sua execução. Um sistema de

planejamento em um ambiente multi-agente constitui-se, portanto, de um grupo de agentes capaz de planejar, coordenar e executar planos, sendo que um agente pode executar uma ou mais dessas tarefas (Ferber, 1999).

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 ambientes 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 à forma de coordenação/execução dos planos gerados, ou a ambos (Weiss, 1999).

Relacionando-se os modos de classificação dos pesquisadores Ferber (1999) e Weiss (1999) para organização de sistemas multi-agentes de planejamento obtém-se as seguintes categorias de sistemas:

- Sistemas com planejamento e coordenação centralizados;
- Sistemas com planejamento distribuído e coordenação centralizada;
- Sistemas com planejamento e coordenação distribuídos.

Em relação à execução dos planos gerados, para cada categoria acima pode-se ter uma execução de planos centralizada ou distribuída entre vários agentes. O caso de um sistema com planejamento, coordenação e execução centralizados representa um sistema de planejamento clássico, desprovido da característica de distribuição.

Neste trabalho, adota-se o termo planejamento distribuído considerando-se somente a fase de elaboração de planos. Assim, o sistema proposto apresenta planejamento distribuído e coordenação centralizada. Essa escolha deve-se ao fato de que no ambiente de controle de missões espaciais o resultado do processo de planejamento é integrado em um único plano final, a ser executado automaticamente.

No Capítulo a seguir são apresentadas as características principais de um ambiente de controle de missões espaciais para o qual se propõe, no Capítulo 5, uma arquitetura multi-agente de planejamento distribuído para a automatização desse ambiente.

CAPÍTULO 3

AMBIENTE DE CONTROLE DE MISSÕES ESPACIAIS

3.1 Definição de um Ambiente de Controle de Missões Espaciais

Uma missão espacial consiste em uma função específica, a ser realizada por um sistema espacial, da qual espera-se um determinado conjunto de produtos. Uma missão espacial pode ter ênfase, por exemplo, em telecomunicações, sensoriamento remoto, coleta de dados e em experimentos científicos e tecnológicos (ECSS-E-70 Part 1, 2000).

Uma missão espacial com ênfase em coleta de dados, por exemplo, tem como função receber e retransmitir para a Terra os sinais emitidos por plataformas de coleta de dados espalhadas em um território. O produto esperado desse tipo de missão consiste nas informações ambientais coletadas pelas plataformas.

Um sistema espacial é desenvolvido para atender aos requisitos de uma missão espacial e é constituído por dois segmentos: o segmento espacial e o segmento de solo. O segmento espacial consiste na própria espaçonave (satélite), constituída por dois elementos: (1) plataforma – conjunto de subsistemas/equipamentos projetados para sustentar a operação da missão em órbita; e (2) carga útil – conjunto de equipamentos dedicados à aplicação da missão espacial.

O segmento de solo é constituído por recursos humanos, infra-estruturas de hardware e de software, e procedimentos envolvidos na preparação e execução das operações de uma missão. O segmento de solo estabelece o elo entre o satélite e os clientes da missão, ou seja, os usuários que possuem interesse nos dados de carga útil transmitidos pelo satélite. A FIGURA 3.1 exemplifica o relacionamento entre o satélite, o segmento de solo e os clientes da missão.

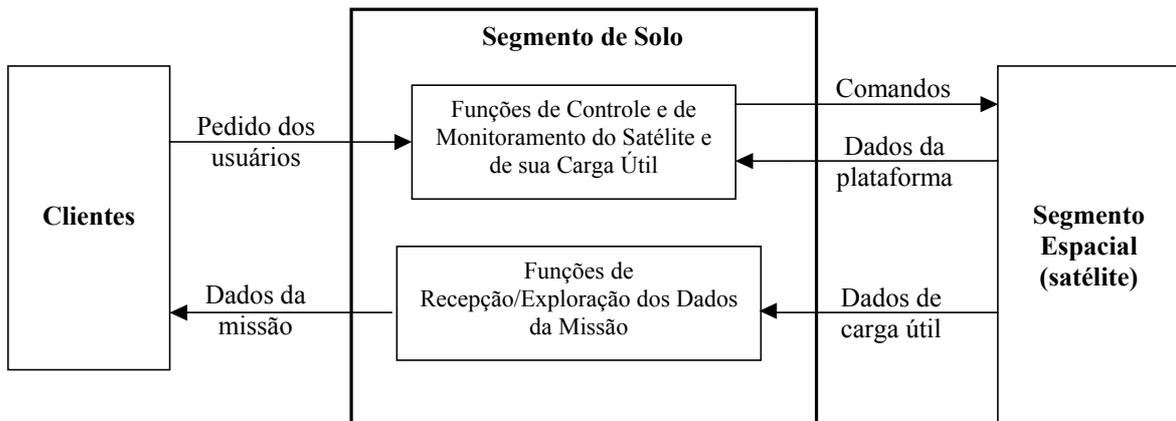


FIGURA 3.1 – Relacionamento entre o satélite, o segmento de solo e o cliente.

FONTE: adaptada de Larson e Wertz (1996).

O segmento de solo é composto de dois componentes principais: (1) a organização das operações de solo; e (2) os sistemas de solo. A organização das operações de solo compreende os recursos humanos responsáveis pela preparação dos dados de operação de uma missão e pela execução das tarefas de operação do satélite. Os sistemas de solo consistem em elementos de solo (hardware, software e instalações) que oferecem suporte ao controle e à monitoração do satélite e à exploração dos dados da missão. Os principais elementos do sistema de solo são:

- Sistema de Controle de Missão (SCM) – logicamente decomposto nos seguintes elementos funcionais: Sistema de Controle de Operações (SCO), Sistema de Controle de Carga Útil (SCCU) e Sistema de Exploração de Missão (SEM). Os dois primeiros são responsáveis por planejar, monitorar e controlar a plataforma e as cargas úteis, respectivamente. O último sistema é responsável por distribuir aos usuários os produtos da missão e dados extras necessários para o planejamento e a utilização dos dados de missão;

- Sistema de Estação Terrena (SET) – constitui a interface direta com o satélite. Esse sistema implementa o *link* de comunicação com o satélite durante os períodos em que este passa sobre a estação. Durante esses períodos são transmitidos comandos ao satélite

(telecomandos) e recebidos dados da plataforma e das cargas úteis (telemetrias). O sistema SET pode ser classificado em duas instâncias lógicas: (1) Estação Terrena utilizada para o controle do satélite (ET-SE), que provê serviços de telemetria, telecomando e de rastreamento tanto para a plataforma como para a carga útil; e (2) Estação Terrena que suporta a exploração da missão (ET-EM), que provê serviços de recepção dos dados de carga útil tais como o recebimento de sinais de telecomunicações, de dados científicos e de imagens da terra;

- Rede de comunicação de dados (NET) – responsável pela conexão entre todos os sistemas de solo permitindo a comunicação entre eles e a comunicação com os usuários da missão.

A FIGURA 3.2 apresenta a estrutura do segmento de solo com os principais elementos de solo descritos anteriormente. A decomposição apresentada é de natureza lógica e na prática, essas funções podem ser fisicamente agrupadas de acordo com o tipo da missão e da organização do segmento de solo.

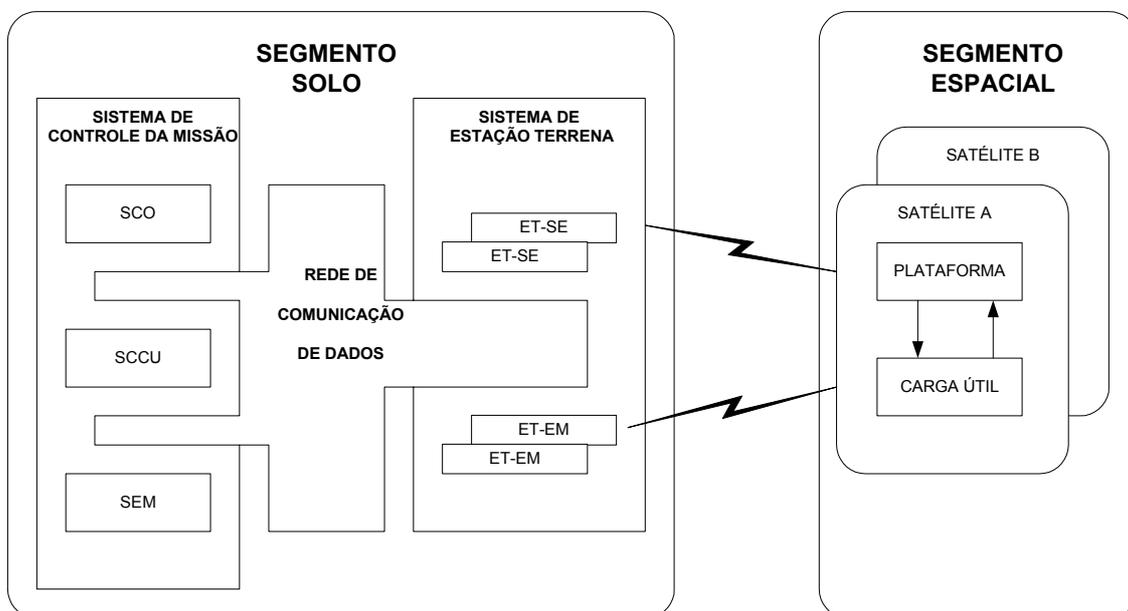


FIGURA 3.2 – Estrutura do segmento de solo.

FONTE: adaptada de ECSS-E-70 Part 1 (2000)

3.2 Planos de Controle de Operações de Missões Espaciais

As operações de controle de missões espaciais são executadas de acordo com dois tipos de planos principais: o Plano de Operações de Vôo (POV) e o Plano de Operações de Solo (POS) (ECSS-E-70 Part 1, 2000).

As operações de vôo correspondem a todas as atividades relacionadas ao planejamento, à execução e à avaliação do controle do satélite quando em órbita. Já as operações de solo correspondem a todas as atividades relacionadas ao planejamento, à execução e à avaliação do controle das facilidades de solo de suporte, tais como as estações terrenas e a rede de comunicação de dados de solo.

O POV tem como finalidade manter o satélite em órbita trabalhando de forma a atingir os objetivos da missão. Para isso, o POV contém todas as informações necessárias para o controle em órbita do satélite, tais como procedimentos de controle de vôo (PCV), procedimentos de recuperação de contingências, regras, planos e cronogramas.

Todas as atividades do POV têm como ponto de partida a passagem do satélite sobre a estação terrena. A quantidade de tempo que um satélite permanece visível à uma determinada estação terrena determina quais operações de vôo devem ser realizadas durante uma passagem. As atividades típicas de uma passagem, apresentadas na FIGURA 3.3, se dividem em três períodos: pré-passagem, passagem e pós-passagem.

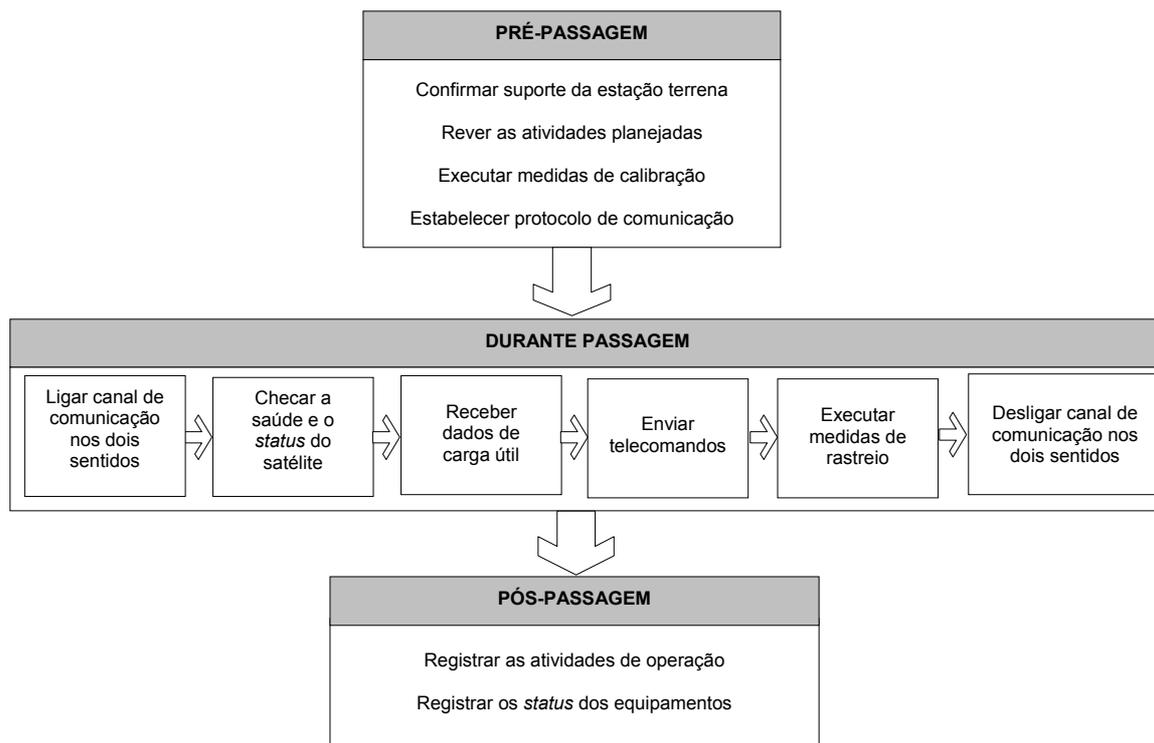


FIGURA 3.3 – Atividades típicas de uma passagem.

FONTE: adaptada de Larson e Wertz (1996)

Os telecomandos enviados durante uma passagem podem ser: (1) telecomandos de tempo real, também denominados comandos de solo; ou (2) arquivos de comandos pré-preparados para serem armazenados na memória de bordo do satélite, também denominados comandos de bordo.

Os comandos de solo consistem nos telecomandos executados em tempo real durante a passagem de um satélite sobre uma estação terrena. Os comandos de bordo, também denominados comandos *time-tagged*, são executados fora de passagem e podem conter, por exemplo, comandos para atualizar softwares em bordo ou para realizar manobras.

Existem arquivos de comandos de bordo que são constituídos por comandos voltados para a carga útil do satélite, ou seja, para a obtenção dos dados que consistem o objetivo da missão espacial. Esse tipo de arquivo é denominado plano de *payload* (carga útil). A elaboração de um plano de *payload* para satélites de sensoriamento remoto, por

exemplo, obedece às requisições de captura de imagens dos vários usuários de uma missão espacial (Elder e Payne, 2004).

O Plano de Operações Solo (POS), em contraste com o POV, é um plano que orienta a operação das facilidades de solo para oferecer suporte ao controle de satélites em órbita. Pode-se ter um único POS para vários satélites que utilizam os mesmos recursos de solo, ou seja, que compartilham uma mesma estação terrena e a rede de comunicação de dados (ECSS-E-70 Part 1, 2000).

O POS é constituído por planos que escalonam os satélites a serem rastreados por uma estação terrena e que configuram a estação terrena em relação a cada satélite. Essa configuração consiste em ações pré-passagem, realizadas antes do início de um rastreio, e pós-passagem, realizadas ao término do rastreio.

3.3 Equipes de Operação e de Suporte

Existem duas diferentes equipes para controlar uma missão espacial e gerenciar as facilidades de solo – a equipe de operação e a equipe de suporte. A equipe de operação é estruturada da seguinte forma (ECSS-E-70 Part 1, 2000):

- Grupo de Controle de Vôo – responsável pelo controle da missão e do satélite;
- Grupo de Dinâmica de Vôo – responsável pela determinação e previsão de órbita e de atitude, cálculo e avaliação de manobras, e previsão de eventos orbitais e de dados de apontamento da antena da estação terrena. Este grupo oferece suporte à equipe de Controle de Vôo;
- Grupo de Operações de Solo – responsável por operar e manter as facilidades de suporte de solo, tais como as estações terrenas, as redes de comunicação de dados e o centro de controle de missão;
- Grupo de Exploração de Missão – responsável pela interface com os usuários de uma missão, arquivando os produtos e distribuindo os dados de carga útil.

A equipe de suporte, por sua vez, é constituída pelos seguintes grupos:

- Grupo de Suporte de Solo – composto por especialistas dos sistemas de solo que fornecem suporte às equipes de operações de solo;
- Grupo de Suporte de Projeto – composto por especialistas do satélite que fornecem suporte à equipe de controle de vôo.

As equipes apresentadas consistem em recursos humanos responsáveis pela preparação e execução das várias tarefas de operações de uma missão. No ambiente de controle de missões espaciais, é ideal que essas equipes sejam subsidiadas por infra-estruturas de hardware e de software a fim de contornar a complexidade do ambiente e também reduzir os custos associados à sua operação.

Diante das atuais necessidades de redução de custos e de implementação de melhorias qualitativas na infra-estrutura de software do ambiente de controle de missões espaciais, observa-se um crescente interesse pela implantação de softwares que automatizem o processo de planejamento e de controle para várias missões. Assim, no Capítulo 4 a seguir, apresentam-se trabalhos de pesquisadores e especialistas da área espacial voltados para essa automatização.

CAPÍTULO 4

PLANEJAMENTO E AUTOMATIZAÇÃO DE OPERAÇÕES ESPACIAIS

O planejamento automático de operações espaciais envolve a geração de uma seqüência de comandos a partir de objetivos de alto nível. Essa seqüência de comandos codifica as restrições de operabilidade relacionadas às missões espaciais. O planejamento automático, aliado à execução automatizada das operações espaciais contidas nos planos de controle gerados, permite reduzir as equipes de planejamento e de operação. Com isso, pode-se diminuir os custos de manutenção dos satélites em órbita.

4.1 Motivação e Tendências para a Automatização

A tendência atual consiste em encontrar soluções de automatização para diminuir os custos relacionados ao controle de missões espaciais por meio da redução das equipes de planejamento e de operação. Além da redução de custos, as preocupações atuais também consistem em oferecer maior reconfigurabilidade e confiabilidade às tarefas do ambiente de controle de missões espaciais para várias missões.

Essas preocupações podem ser observadas no último congresso internacional de operações espaciais, denominado SpaceOps 2004, por meio das seguintes citações:

- “Mais e mais gerentes de operações estão voltando suas atenções para a possibilidade de automatizar as operações de missões espaciais dentro do segmento de solo, com a expectativa de diminuir custos por meio da redução das equipes de controles de satélites” (Monham et al., 2004);

- “O aumento do nível de automação é identificado como um dos principais meios para reduzir os custos de operações” (Ferri et al., 2004);

- “Durante os últimos anos, o objetivo do ESOC – Centro de Operações da Agência Espacial Européia tem sido explorar os possíveis caminhos para aumentar a automação das atividades de operações de satélites” (Ercolani et al., 2004);

- “É necessário que o sistema de planejamento seja configurável para satisfazer às necessidades de alterações ao longo da vida útil de um satélite” (Elder e Payne, 2004);

- “A solução de suporte ao planejamento e à execução automatizada de operações deve oferecer suporte à várias missões espaciais ou à constelações de satélites” (Harris et al., 2004).

A seguir, são apresentados alguns trabalhos que empregam o planejamento para automatizar o ambiente de planejamento e de controle de missões espaciais. Nesse ambiente, existe uma forte preocupação com restrições de tempo e de recursos.

Em relação às restrições de tempo, um satélite apresenta, por exemplo, um tempo de órbita e um período de visibilidade, que consiste em uma faixa de tempo restrita em que o satélite se torna visível a uma estação terrena e pode ter seus sinais capturados (rastreamento) pela estação. Em relação às restrições de recursos, existem restrições de orçamento para novos projetos e para a manutenção de projetos existentes, restrições de consumo de energia, uma quantidade limitada de estações terrenas para a captura de sinais, dentre outras restrições.

Nos trabalhos analisados, a automatização das operações espaciais é implementada investindo-se: (1) na automatização do segmento de solo; (2) na autonomia do satélite, desenvolvendo-se sistemas de controle de bordo inteligentes com o objetivo de diminuir as tarefas de solo; ou (3) em ambos.

Como observado por Ferri et al. (2004), a automatização não pode ser implementada como um todo, mas deve ser iniciada com uma função e crescer de acordo com as experiências adquiridas nas operações. Assim, este trabalho restringe-se à automatização de operações espaciais do segmento de solo, como uma primeira

abordagem de automatização dentro do contexto das missões espaciais brasileiras, a caminho da automatização e autonomia de ambos os segmentos.

4.2 Automatização do Segmento de Solo

A seguir, apresentam-se os trabalhos analisados que se relacionam estritamente à automatização do segmento de solo.

4.2.1 Solução do JPL para a NASA

O JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) do Instituto de Tecnologia da Califórnia desenvolveu um ambiente de planejamento automatizado denominado ASPEN – *Automated Scheduling and Planning Environment* (Chien et al., 2000). O ASPEN é um sistema orientado a objeto de planejamento e escalonamento reconfigurável.

O conhecimento de um satélite é codificado no sistema ASPEN por meio de sete classes de modelo fundamentais: atividades, parâmetros, dependências entre parâmetros, restrições temporais, reservas, recursos e variáveis de estado. Esses sete componentes são usados para descrever o que um satélite pode e não pode fazer durante suas operações.

Uma vez definidos os tipos de atividades, instâncias específicas podem ser criadas a partir dos tipos. Uma coleção de instâncias de atividades é o que define um plano.

A resolução de conflitos é realizada de forma iterativa. Um conflito é definido como um conjunto de maneiras de se violar uma restrição de um plano, como por exemplo, o uso excessivo de um recurso, uma transição de estados ilegal ou um estouro de tempo. Para cada tipo de conflito existe um conjunto de métodos de reparo para a sua correção.

Durante o reparo iterativo, os conflitos são detectados e resolvidos um por vez até não existirem mais conflitos ou for atingido um limite de tempo definido pelo usuário.

Os conflitos podem ser corrigidos pelos seguintes métodos de reparo pré-definidos: mover uma atividade, adicionar uma nova instância de uma atividade, excluir uma

atividade, detalhar uma atividade, abstrair uma atividade, realizar uma reserva de um recurso, cancelar uma reserva, conectar uma restrição temporal, desconectar uma restrição e mudar um valor de parâmetro.

O algoritmo de reparo primeiramente seleciona um conflito e depois seleciona um método de reparo. O tipo de conflito selecionado determina quais métodos podem repará-lo.

4.2.2 Solução SciSys em Parceria com o ESTEC/ESA

A empresa SciSys da Inglaterra em parceria com o ESTEC (*European Space Research & Technology Centre*) da ESA (*European Space Agency*) propõem um conjunto de ferramentas de gerenciamento de missões para o planejamento de missões e a execução automática de planos (Harris et al., 2002). Esse conjunto de ferramentas gera planos para satélites que são visíveis às estações terrenas por um tempo limitado e, por isso, precisam fazer o maior uso possível da estação terrena durante esse tempo.

Os componentes do sistema de gerenciamento de missões encontram-se descritos a seguir.

Geração de Visibilidade – este componente baseia-se no conjunto de visibilidades. Uma visibilidade define quando uma estação terrena pode estabelecer contato com um determinado satélite da constelação.

Planejador de Contatos – este componente gera um plano de contatos. Um contato consiste no período de tempo em que um satélite pode ser rastreado por uma estação terrena. O plano de contatos é gerado a partir das seguintes informações: (1) as visibilidades geradas da rede de estações terrenas para a constelação de satélites; (2) o conjunto de requisitos de contatos definidos pelos usuários; e (3) os tipos de contatos que as estações terrenas oferecem.

Um requisito de contato pode ser do tipo *standing* ou *one-off*. O tipo *standing* significa uma demanda regular por contato, como por exemplo, o requisito de contato: “deve

haver um contato para um determinado satélite no máximo a cada x segundos”. O tipo *one-off* significa uma demanda por contato única, como por exemplo: “deve haver no mínimo x segundos de contato entre o tempo de início de passagem de um satélite e o seu tempo de fim de passagem”.

Um plano de contatos é criado relacionando-se as visibilidades aos requisitos de contatos dos usuários e às restrições de tipo de contato que as estações terrenas oferecem.

Planejamento de Missões – esta parte efetua o planejamento das operações de um satélite, importando o plano de contatos. Após o processo de detecção e resolução de conflitos ter resolvido todos os conflitos, gera-se um plano executável. Esse plano é passado para o processo executor de planos.

Execução de Planos – este processo tem como entrada um plano executável. Ele executa o plano no tempo correto, passando os comandos e os procedimentos (operações de bordo) para o processo de execução de procedimentos.

Execução de Procedimentos – inicia um comando e a transmissão de uma fila de comandos (operações de bordo).

Transmissor de Filas de Comandos – este é um processo específico para cada missão, que carrega os comandos de bordo no satélite. O transmissor de filas de comandos é uma função que pode ser iniciada pelo processo de execução de procedimentos.

4.2.3 Solução do ESOC/ESA

O centro de operações espaciais europeu ESOC (*European Space Operations Centre*) da ESA propõe uma arquitetura conceitual de sistemas que oferece suporte à automação de operações de missões (Ferri et al., 2004). Os papéis dos diferentes sistemas presentes nessa arquitetura são apresentados abaixo.

Sistema de Preparação de Operações (OPS) – oferece suporte ao controle *off-line* de validação e configuração dos produtos envolvidos no processo de operações de satélites, principalmente os procedimentos e as bases de dados operacionais.

Sistema de Planejamento de Missões (MPS) – oferece suporte ao planejamento e ao escalonamento *off-line* de todas as operações de missões, considerando as restrições de disponibilidade de recursos espaciais e de solo. A saída do MPS é um conjunto de planos escalonados livres de conflito para serem executados em solo ou em bordo.

Sistema de Gerenciamento ESTRACT (EMS) – oferece suporte ao gerenciamento centralizado dos recursos de solo multi-missão, incluindo as estações terrenas e as redes de comunicação. Esse sistema interage, durante a fase de planejamento, com os diferentes Sistemas de Planejamento de Missões específicos de cada missão. Durante a fase de execução, o EMS interage com os sistemas de solo que oferecem suporte à execução automatizada de operações, que consistem no Sistema de Automação de Missões e no Sistema de Computador de Estações.

Sistema de Interface de Redes (NIS) – oferece suporte à troca de telemetrias, de telecomandos e de mensagens administrativas com o equipamento final das estações terrenas.

Sistema de Controle de Missões (MCS) – oferece suporte às operações de controle e de monitoramento de operações. Esse sistema troca dados operacionais, primeiramente dados de telemetria e de telecomando, com a estação terrena por meio do NIS. O MCS recebe do Sistema de Planejamento de Missões um Escalonamento de Operações de Bordo e o envia para o satélite para ser executado posteriormente.

Sistema de Dinâmica de Vôo (FDS) – oferece suporte à determinação, ao monitoramento, à previsão e ao controle de atitudes e órbitas de satélites.

Computador de Estações (STC) – oferece suporte ao controle e ao monitoramento remoto dos equipamentos das estações terrenas, baseando-se na execução automática dos escalonamentos recebidos do EMS.

Sistema de Automação de Missões (MAS) – oferece suporte à execução automatizada de procedimentos de controle. Esse sistema acessa os serviços externos do MCS e do NIS. Recebe do Sistema de Planejamento de Missões (MPS) um Escalonamento de Operações de Solo executável e utiliza as definições de procedimentos operacionais produzidas pelo Sistema *off-line* de Preparação de Operações (OPS).

4.3 Análise das Soluções Atuais

A análise das atuais soluções adotadas ou em implementação por centros de operações espaciais como o ESOC ou centros de pesquisas espaciais como o JPL e o ESTEC exemplifica a atual tendência de automatização do ambiente de planejamento e operação de missões espaciais.

As soluções apresentadas lidam com restrições de tempo durante o processo de planejamento. No entanto, essas soluções consideram uma restrição temporal como um relacionamento entre o começo/fim de uma ação com o começo/fim de outra ação. Uma restrição temporal estabelece, por exemplo, que a ação “aquecer instrumento x ” deve terminar antes da ação “usar instrumento x ”.

A solução proposta no Capítulo 5 a seguir considera que as ações não apresentam somente restrições de ordenação, mas também apresentam durações. Especificando-se ações com duração é possível estabelecer um mecanismo que verifica se há tempo suficiente para se alcançar um conjunto de objetivos e, no caso de tempo insuficiente, desconsidera ações de menor prioridade vinculadas a um objetivo (de menor prioridade). Desconsiderando-se ações vinculadas a um objetivo pode-se reduzir a quantidade de tempo para se atingir o objetivo.

No domínio do problema de planejamento tem-se um conjunto de objetivos a serem alcançados e ações que contribuem para que esses objetivos sejam atingidos. Para que o algoritmo de planejamento (planejador) seja capaz de desconsiderar uma ação que contribui com um determinado objetivo, cada objetivo do domínio de planejamento deve conter uma lista com as ações que contribuem com o objetivo. Assim, elimina-se

desta lista apenas o vínculo entre o objetivo e a ação que se deseja desconsiderar (de menor prioridade). Isso faz com que o algoritmo de planejamento não considere esta ação durante a geração de um plano para se atingir o objetivo.

Assim, neste trabalho propõe-se o mecanismo de planejamento temporal descrito acima. Esse mecanismo considera que as ações e os objetivos possuem durações e prioridades, permitindo estimar quais ações podem ser executadas dentro do período de visibilidade de um determinado satélite para se atingir os principais objetivos da missão.

Esse mecanismo, denominado gerenciador de planejamento temporal, é adotado por uma arquitetura de agentes planejadores, apresentada no Capítulo 5 a seguir, proposta para automatizar o planejamento e a execução de operações espaciais.

CAPÍTULO 5

PROPOSTA

Para a automação do segmento de solo de sistemas espaciais propõe-se uma arquitetura multi-agente hierárquica de planejamento distribuído denominada AOSMA – Arquitetura de Operações Solo Multi-Agente. Nessa arquitetura os agentes atuam de forma hierárquica e distribuída para a geração de planos para o controle de missões espaciais.

5.1 Arquitetura AOSMA

A característica hierárquica presente na arquitetura AOSMA deve-se ao fato de os agentes dessa arquitetura 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. A FIGURA 5.1 ilustra a arquitetura AOSMA, apresentando a hierarquia de planejamento existente entre os agentes que constituem essa arquitetura.

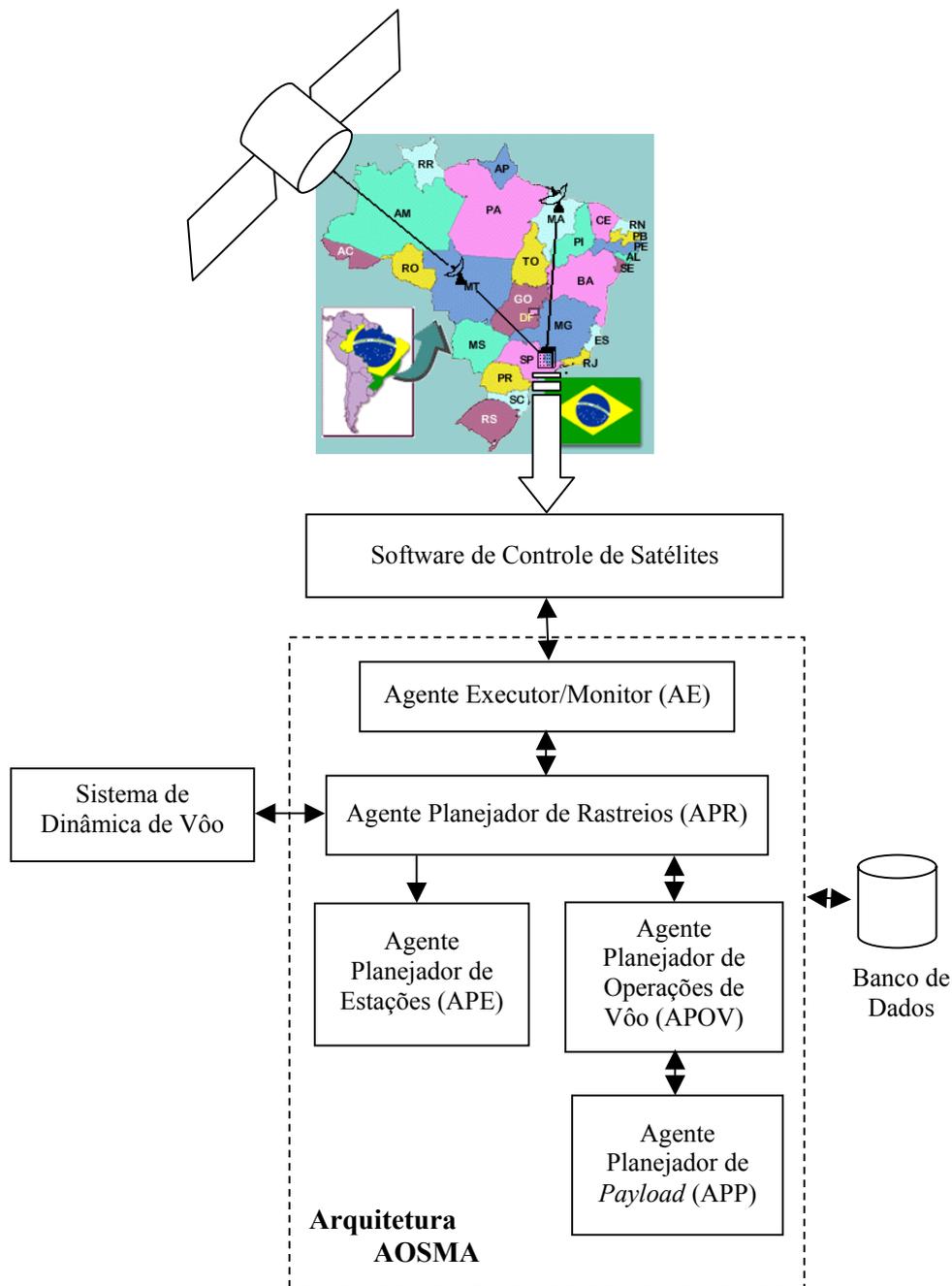


FIGURA 5.1 – Arquitetura de automação de operações solo multi-agente (AOSMA).

Como ilustrado na FIGURA 5.1, o Agente Planejador de Rastreiios encontra-se no nível mais alto da hierarquia do processo de planejamento. Descendo a hierarquia, encontram-se o Agente Planejador de Estações e o Agente Planejador de Operações de Voo no nível intermediário e o Agente Planejador de *Payload* no último nível. A seguir, apresentam-se as diferentes funcionalidades desses agentes.

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, em qual ordem e com qual duração (período de rastreamento). O Planejador de Rastreios elimina o problema de rastreios com horários conflitantes em relação a uma mesma estação, encurtando ou cancelando o rastreio do satélite com menor prioridade.

Agente Planejador de Estações (APE) – responsável pela geração de Planos de Configuração das Estações Terrenas (PE) em relação aos satélites a serem rastreados. Um Plano de Configuração de uma Estação Terrena contém ações a serem executadas manualmente pelo grupo de Operações de Solo em uma determinada estação terrena, antes e depois do rastreio de cada satélite. Assim, este plano consiste em um roteiro de ações cujo objetivo é conduzir o trabalho manual do grupo de Operações de Solo. As ações a serem executadas antes do rastreio de um satélite podem ser, por exemplo, configurar os equipamentos da estação terrena para a comunicação com um determinado satélite e realizar o apontamento da antena para a captura de seus sinais.

Agente Planejador de *Payload* (APP) – responsável pela geração de Planos de *Payload* (PP) que atendam às requisições dos vários usuários de carga útil de uma missão espacial. Um Plano de *Payload* é carregado em bordo durante uma passagem sobre uma estação terrena e executado posteriormente, quando o satélite estiver fora do alcance da estação.

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/Monitor durante a sua passagem. Este agente obtém do Agente Planejador de Rastreios o Plano de Rastreios de uma determinada estação terrena e gera, para um determinado satélite, um plano de vôo ajustável ao período de rastreio pré-determinado, considerando os horários de início e fim de passagem. O APOV comunica-se com o Agente Planejador de *Payload* para solicitar e obter o plano gerado por esse agente para o satélite considerado, que consiste em uma ação a ser inserida no POV.

Agente Executor/Monitor – 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. Essas informações, fornecidas pelo satélite às estações terrenas, são denominadas telemetrias.

A FIGURA 5.2 a seguir apresenta explicitamente os níveis hierárquicos do processo de planejamento da arquitetura AOSMA. A FIGURA 5.3 mostra como os planos gerados pelos agentes planejadores da arquitetura se inter-relacionam, obedecendo à hierarquia entre eles.

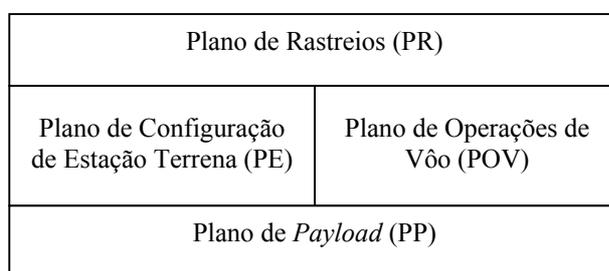


FIGURA 5.2 – Hierarquia do processo de planejamento da arquitetura AOSMA.

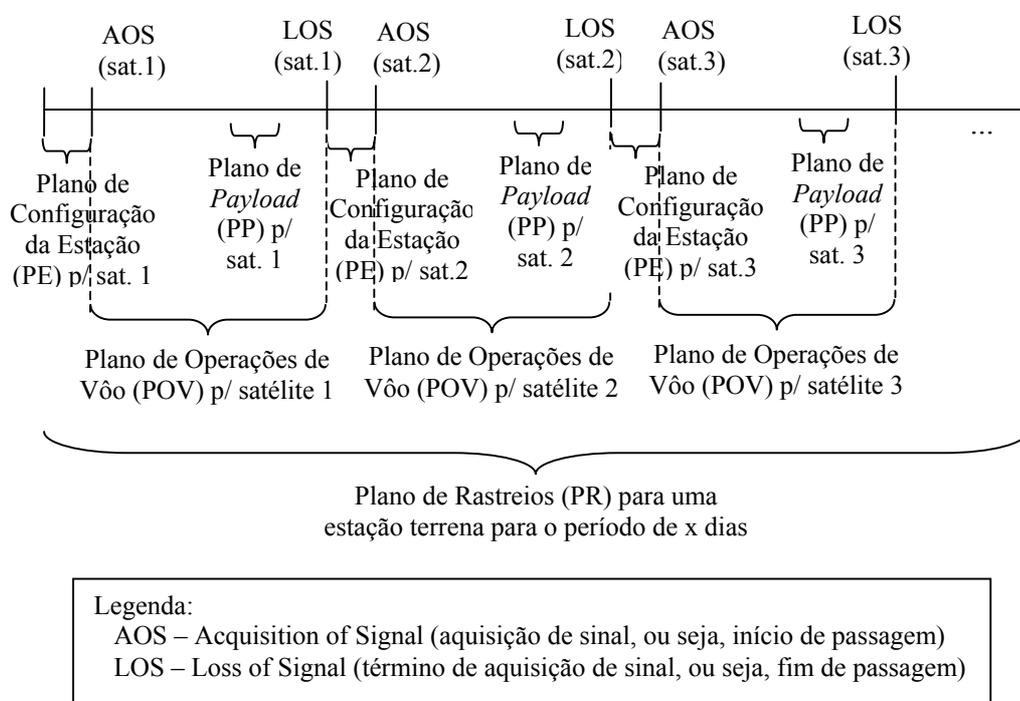


FIGURA 5.3 – Relacionamento hierárquico entre os planos da arquitetura.

5.2 Gerenciador de Planejamento Temporal

O agente Planejador de Operações de Vôo da arquitetura AOSMA adota um mecanismo de planejamento temporal. Este mecanismo, denominado gerenciador de planejamento temporal, utiliza o paradigma de planejamento de ordem parcial, que permite decompor o problema de planejamento em partes (Russell e Norvig, 1995) e o planejamento temporal, assumindo que as ações e os objetivos possuem durações.

Assim como em (Coddington, 2002), no gerenciador de planejamento temporal proposto os objetivos apresentam prioridades. No entanto, neste trabalho o fator prioridade é aplicado de modo distinto. Coddington utiliza o fator prioridade para eliminar os objetivos de menor prioridade do processo de planejamento no caso de não haver tempo suficiente para que todos possam ser alcançados.

No gerenciador de planejamento temporal proposto, a atribuição de prioridades aos objetivos permite que se planeje primeiramente para as situações com maior grau de importância e, em caso de restrição de tempo para se alcançar os demais objetivos, que se atualize os objetivos de menor prioridade.

A atualização de um objetivo tem como finalidade reduzir a quantidade de ações para alcançá-lo de forma a satisfazer a restrição de tempo. Para a atualização de um objetivo, propõe-se que as ações também sejam priorizadas.

A atribuição de prioridades às ações conduz o planejador na tarefa de escolha de quais ações, relacionadas a um objetivo, eliminar do processo de planejamento. Desconsiderando-se ações, reduz-se o tempo total para se alcançar o objetivo considerado.

O principal benefício desse gerenciador temporal advém da atribuição de prioridades às ações. Eliminado-se somente as ações com menor prioridade é possível alcançar o objetivo, mesmo que de forma parcial, dentro da restrição de tempo de execução do plano inteiro. Essa solução evita que se desconsidere todo o objetivo.

No entanto, para que essa solução seja adotada deve-se manter para cada objetivo uma lista com as ações que contribuem com o objetivo e as respectivas prioridades dessas ações em relação ao objetivo. A prioridade de uma ação em relação a um objetivo consiste em um valor simbólico que pode ser alterado entre as passagens de um satélite a fim de melhor retratar a necessidade de ocorrência da ação na próxima passagem.

A FIGURA 5.4 apresenta o gerenciador de planejamento temporal proposto, que consiste no mecanismo de raciocínio do agente Planejador de Operações de Vôo.

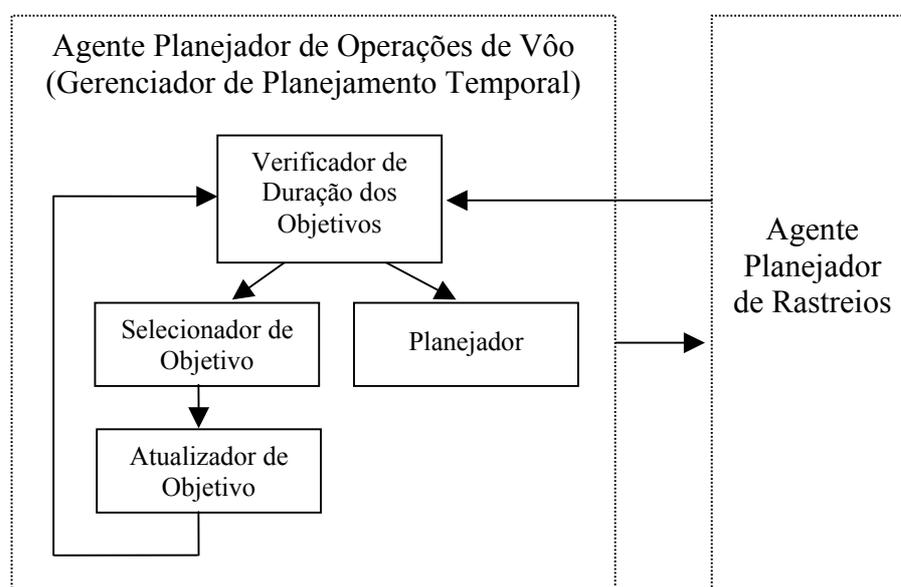


FIGURA 5.4 – Gerenciador de planejamento temporal.

O gerenciador de planejamento temporal proposto inclui os seguintes componentes:

- Verificador de Duração dos Objetivos, verifica se existe tempo suficiente para alcançar todos os objetivos de acordo com as suas durações. Se o tempo estimado for suficiente, gera-se o plano. Caso contrário, seleciona-se um objetivo para buscar reduzir a quantidade de ações a ele vinculadas;

- Selecionador de Objetivo, realiza duas funções: (1) seleciona o objetivo de menor prioridade para no próximo passo eliminar um conjunto de ações vinculadas a este objetivo; ou (2) cancela o objetivo de menor prioridade no caso de não restar ações vinculadas a ele. O cancelamento de um objetivo que não apresenta ações vinculadas a

ele evita que o agente planejador tente gerar um plano para alcançar um objetivo que não é possível de ser atingido;

- Atualizador de Objetivo, atualiza o objetivo selecionado eliminando os vínculos existentes entre este objetivo e as ações de menor prioridade;

- Planejador, gera um plano de ações para alcançar o conjunto de objetivos selecionado. O plano de ações é gerado segundo o paradigma de planejamento de ordem parcial estendido para gerar planos condicionais (Russell e Norvig, 1995).

Adotando o gerenciador de planejamento temporal apresentado, o agente Planejador de Operações de Vôo verifica, antes de iniciar a geração do POV, se é possível alcançar todos os seus objetivos dentro do tempo de período de rastreamento do satélite considerado. Com essa verificação e a possibilidade de desconsiderar ações/objetivos, o agente é capaz de gerar um plano ajustável à limitação de tempo.

5.3 Funcionamento da Arquitetura AOSMA

Os agentes planejadores da arquitetura AOSMA realizam suas tarefas de planejamento para um período qualquer de dias consecutivos, que deve ser informado ao Agente Planejador de Rastreamentos. Com um prazo de 48 horas de antecedência a partir da data de início do período de planejamento, o Agente Planejador de Rastreamentos inicia o processo de planejamento para a geração de planos para o controle de várias missões espaciais.

O Agente Planejador de Rastreamentos (APR) obtém, para o período de dias especificado, as previsões de órbitas do conjunto de satélites a serem rastreados por uma determinada estação terrena. As informações de previsões de órbitas consistem: (1) nas datas e horários de início e fim de passagem de cada satélite em relação à estação terrena considerada; e (2) nos dados de apontamento da antena da estação terrena em relação a cada satélite. Essas informações são obtidas a partir do Sistema de Dinâmica de Vôo, que é um sistema externo à arquitetura AOSMA.

A partir das previsões de órbitas para os vários satélites em relação a uma única estação terrena, o APR verifica se algum horário de fim de passagem (LOS) de qualquer satélite sobrepõe algum horário de início de passagem (AOS) de outro satélite para uma mesma data. Se houver sobreposição de horários, o APR soluciona este conflito reduzindo o período de rastreamento do satélite de menor prioridade de forma que não haja sobreposição.

Além de escalonar os períodos de rastreios de vários satélites em relação a uma mesma estação terrena de forma a evitar conflitos, o Agente Planejador de Rastreios (APR) reserva uma quantidade de tempo pré-determinada antes do início de passagem de cada satélite, denominado período pré-rastreamento. Reserva-se este período de tempo para que haja tempo hábil para os grupos de Controle de Vôo e de Operações de Solo se preparem para o rastreamento de um novo satélite.

A FIGURA 5.5 apresenta um Plano de Rastreios recém-gerado pelo Agente Planejador de Rastreios para uma determinada estação terrena. Como pode-se observar, este plano contém, em sua fase inicial, apenas os horários de início e fim dos períodos de pré-rastreamento e de rastreamento de vários satélites. Associados a esses horários encontram-se os dados de apontamento da antena da estação terrena para rastrear os satélites. Esses dados são omitidos na FIGURA 5.5 para simplificar a apresentação do plano.

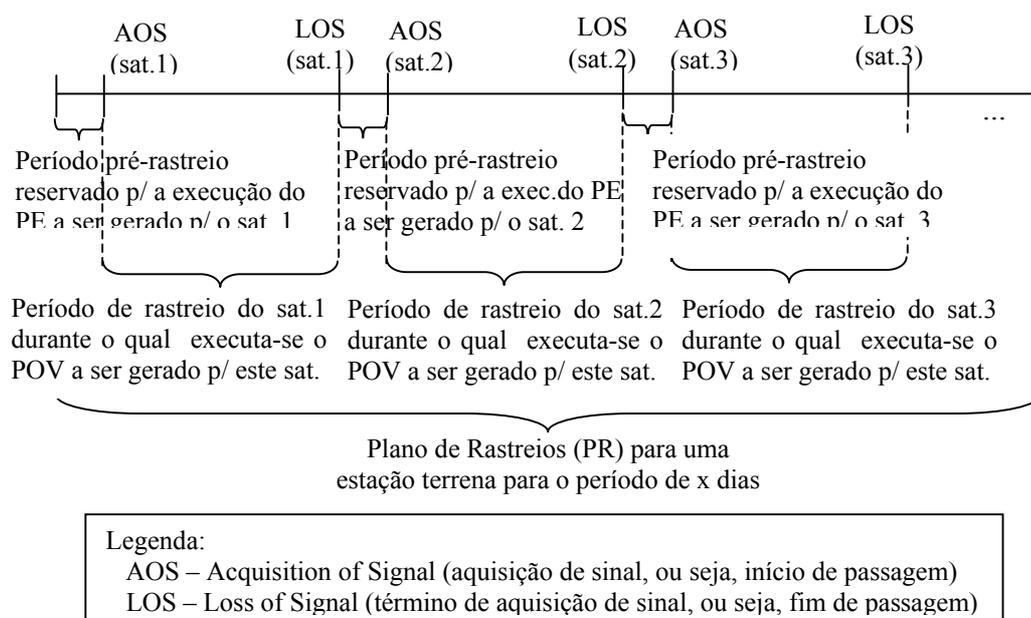


FIGURA 5.5 – Plano de rastreios (PR) em fase inicial.

Uma vez gerado o Plano de Rastreios para uma determinada estação terrena, o Agente Planejador de Rastreios (APR) comunica-se com o Agente Planejador de Estações e com o Agente Planejador de Operações de Vôo para fornecer a esses agentes as seguintes informações, essenciais à tarefa de planejamento desses agentes:

- a seqüência de satélites a serem rastreados;
- os períodos de tempo dentro dos quais esses agentes devem gerar seus respectivos planos para os satélites a serem rastreados;
- os dados de apontamento da antena da estação terrena para cada satélite.

Com base nessas informações, o Agente Planejador de Estações gera, para cada satélite a ser rastreado, um Plano de Configuração para a Estação Terrena considerada. O agente gera o Plano de Configuração de Estação Terrena (PE) para ser executado dentro do período pré-rastreio de um determinado satélite.

O Agente Planejador de Operações de Vôo, com base nas informações fornecidas pelo Agente Planejador de Rastreios e nos objetivos de manter os satélites operando de forma adequada e de obter os produtos finais das missões espaciais, gera um Plano de Vôo (POV) para cada satélite a ser rastreado pela estação terrena. Esse agente gera um Plano de Vôo para ser executado dentro do período de rastreio (AOS – LOS) de um determinado satélite.

Uma vez gerados os Planos de Vôo para os períodos especificados no Plano de Rastreios, o agente Planejador de Operações de Vôo retorna ao agente Planejador de Rastreios os seus resultados.

Ao receber os Planos de Vôo gerados para os vários satélites, o agente Planejador de Rastreios insere cada um desses planos dentro do Plano de Rastreios no período de rastreio correspondente a cada satélite. A FIGURA 5.6 apresenta o Plano de Rastreios em sua fase final, pronto para ser executado automaticamente pelo agente Executor/Monitor da arquitetura AOSMA.

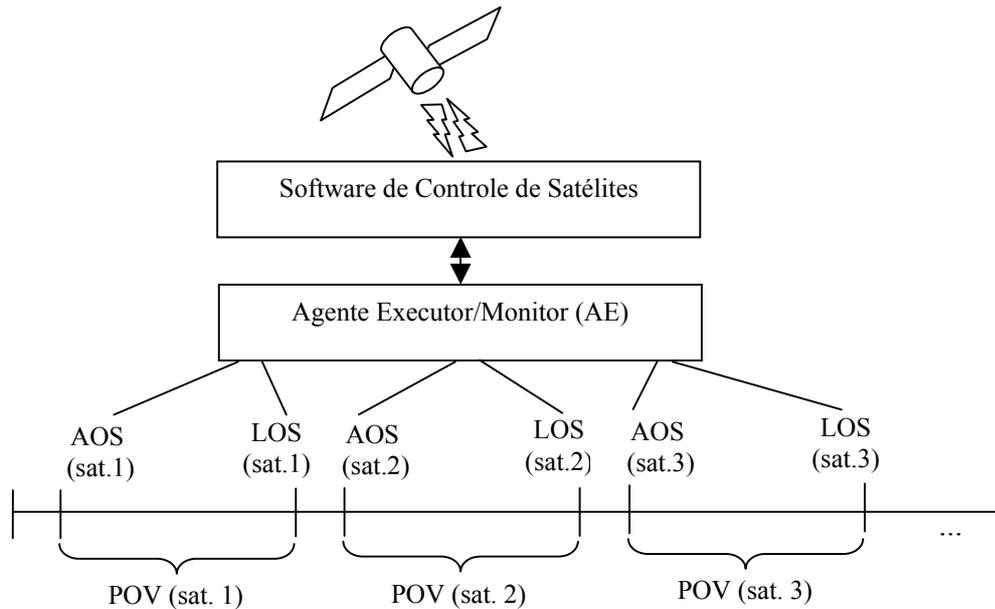


FIGURA 5.6 – Plano de rastreios (PR) em fase final.

O agente Executor/Monitor obtém o Plano de Vôo (POV) de um determinado satélite, que contém ações a serem executadas em instantes de tempo específicos. Obedecendo à sequência de ações (operações espaciais) especificadas no POV, este agente aciona uma função do Software de Controle de Satélites correspondente a cada ação, no instante de tempo planejado. Sem a presença deste agente no ambiente de controle de missões espaciais, o acionamento das funções do Software de Controle de Satélites seria realizado por um operador de satélites.

Assim, o agente Executor/Monitor da arquitetura AOSMA permite reduzir a necessidade da presença de operadores de satélites. Na concepção da arquitetura AOSMA, um operador de satélites se mantém presente no Centro de Controle de Operações apenas para monitorar o processo de execução das operações espaciais e lidar com possíveis falhas de execução. A sua intervenção é necessária somente quando requerida dentro do processo de execução, em caso de falhas.

Reduzindo a tarefa de um operador de satélites ao monitoramento da execução de operações espaciais, facilita-se o trabalho desses profissionais e pode-se evitar possíveis falhas humanas, aumentando a confiabilidade das operações.

Além disso, a automatização da execução de operações espaciais permite que se tenha uma quantidade reduzida de operadores para o controle de várias missões espaciais por meio de várias estações terrenas. Uma vez que a função de um operador de satélites não é mais executar manualmente operações espaciais, mas sim monitorar o processo de execução, ele pode, por exemplo, acompanhar o controle de mais de uma missão espacial (por estações terrenas distintas) em um mesmo instante de tempo.

O agente Executor/Monitor (AE) executa as ações (operações espaciais) contidas no Plano de Vôo de um satélite. Dentre essas operações, encontram-se telecomandos de tempo real e arquivos de comandos pré-preparados para serem armazenados na memória de bordo do satélite. Dentre esses arquivos, os arquivos constituídos por comandos voltados para a carga útil do satélite são denominados Planos de *Payload*.

Um Plano de *Payload* é gerado pelo agente Planejador de *Payload* a pedido do Agente Planejador de Operações de Vôo (para um determinado satélite). Este plano é retornado ao agente Planejador de Operações de Vôo, que o insere dentro do Plano de Vôo do satélite considerado.

Como pode-se observar na descrição do funcionamento da arquitetura AOSMA, essa arquitetura consiste essencialmente em uma organização de agentes especialistas que cooperam entre si obedecendo a uma hierarquia entre eles. Cada agente da arquitetura sabe onde obter informações e para onde enviar os seus resultados (Ferber, 1999). Essas características permitem classificar a arquitetura AOSMA como uma arquitetura multi-agente de estrutura hierárquica e pré-definida (fixa).

5.4 Atividades para a Realização da Proposta

A proposta de trabalho apresentada nas seções anteriores deste capítulo deverá ser desenvolvida e apresentada como trabalho de tese de doutorado até o final do ano letivo de 2006. A sua realização envolve a execução de um conjunto de atividades, que inicia-se com o estudo da linguagem PDDL e a criação de um protótipo de um planejador de ordem parcial.

A próxima atividade consiste em modelar as percepções e as ações dos agentes da arquitetura AOSMA. Uma vez modelados os agentes da arquitetura, pode-se implementá-los em paralelo.

Em relação ao agente Planejador de Operações de Vôo, este agente apresenta em seu mecanismo de raciocínio dois importantes componentes: um gerenciador temporal e o componente Planejador. O projeto e a implementação do componente Planejador motivaram a proposta de dissertação de mestrado apresentada em (Cardoso, 2004).

Por fim, os agentes da arquitetura AOSMA devem ser integrados com o objetivo de compartilharem seus planos. Após essa atividade, segue-se com a fase de testes de unidade e de integração da arquitetura. Os testes serão executados em um ambiente simulado de controle de missões espaciais. Como última atividade, tem-se a geração do documento final.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma nova arquitetura de automação de operações solo multi-agente para o contexto de controle de missões espaciais. A arquitetura AOSMA realiza o planejamento automático das operações de missões espaciais, considerando restrições de tempo e de recursos para o controle de várias missões, e executa os planos de forma automatizada.

Esta arquitetura é constituída por um conjunto de agentes planejadores responsáveis pela geração de planos específicos do sistema de solo. Para alcançar seus objetivos, esses agentes planejadores se comunicam e cooperam entre si segundo uma hierarquia inter-agentes pré-definida. O resultado dessa cooperação consiste na geração de um plano integrado para ser executado automaticamente por um agente executor.

Dentre os agentes da arquitetura, encontra-se o agente planejador de Operações de Vôo, que utiliza como mecanismo de raciocínio um gerenciador de planejamento temporal proposto. Este gerenciador temporal considera que os objetivos e as ações de um agente planejador possuem durações e ambos possuem prioridades.

Baseando-se na análise do tempo de duração dos objetivos, calculados de acordo com a duração das ações vinculadas a cada objetivo, o agente planejador é capaz de concluir que não há tempo suficiente para alcançar todos os objetivos. Com isso, o agente seleciona objetivos para terem seus prazos finais reduzidos, cortando algumas de suas ações em ordem de prioridade.

Essa ação de redução da quantidade de ações vinculadas a um objetivo permite que o objetivo seja alcançado, mesmo que de forma parcial, dentro de um intervalo de tempo disponível. Para o agente planejador de Operações de Vôo este intervalo de tempo restrito é representado pelo período de rastreamento de um satélite.

A proposta da arquitetura AOSMA e do gerenciador de planejamento temporal oferecem as seguintes contribuições para o grupo de controle de missões espaciais brasileiro e para a comunidade de Planejamento de Inteligência Artificial:

- Confere configurabilidade ao planejamento automático de operações espaciais a partir da adoção do conceito de agentes planejadores. Um agente planejador apresenta percepções e ações bem definidas, que são representadas por meio de uma linguagem de descrição do domínio de planejamento. Essa linguagem permite representar o domínio do problema, facilitando, por exemplo, a inclusão ou a exclusão de novas ações de planejamento;

- Automatiza a execução de operações espaciais por meio do agente Executor/Monitor. As operações espaciais encontram-se especificadas no plano de Operações de Vôo. A automatização da execução de operações espaciais permite que se mantenha uma quantidade mínima de operadores de satélites frente à crescente demanda de novas missões espaciais, além de conferir maior confiabilidade às operações, evitando-se eventuais falhas humanas;

- Oferece um mecanismo de gerenciamento temporal que permite a um agente analisar se há tempo suficiente para alcançar um conjunto de objetivos e, no caso do tempo ser insuficiente, reduzir a quantidade de ações, por ordem de prioridade, vinculadas a um objetivo (de menor prioridade). Com isso, torna-se possível alcançar o conjunto de objetivos, de forma parcial, dentro de um período de tempo limitado.

Este gerenciador de planejamento temporal oferece uma contribuição significativa quando aplicado no contexto de automatização do ambiente de controle de operações espaciais para controlar os recursos de solo para várias missões.

No caso do período de rastreamento de um satélite ter sofrido reduções em seu intervalo de tempo devido à uma intersecção com o período de rastreamento de um outro satélite, o gerenciador de planejamento temporal oferece um mecanismo que define objetivos e ações a serem desconsiderados durante a geração do plano de vôo do satélite a fim de adequar o plano ao período de rastreamento reduzido.

Enfatiza-se que o principal benefício desse gerenciador temporal advém da atribuição de prioridades às ações. Neste trabalho, propõe-se que sejam eliminadas do processo de planejamento somente as ações de menor prioridade relacionadas a um determinado objetivo. Eliminando-se somente as ações com menor prioridade é possível alcançar o objetivo, mesmo que de forma parcial, dentro da restrição de tempo de execução do plano inteiro (período de rastreamento reduzido). Essa solução evita que se desconsidere todo o objetivo, como proposto por Coddington (2002).

Em relação a arquitetura AOSMA como um todo, ressalta-se que o objetivo dessa automação não consiste em eliminar a necessidade do trabalho humano, mas sim substituir as funções simples e repetitivas por ferramentas automatizadas, deixando as tarefas mais complexas para os homens. Espera-se que com essa automatização consiga-se reduzir custos operacionais, aumentar a confiabilidade da execução de operações espaciais e a reconfigurabilidade da tarefa de planejamento, de forma a facilitar o trabalho das equipes de planejamento e de operação de missões.

Pretende-se com a proposta de implementação da arquitetura AOSMA desmembrar outros trabalhos de pesquisa relevantes.

Até o momento, o projeto e a implementação do componente Planejador do agente Planejador de Operações de Vôo motivaram a proposta de dissertação de mestrado apresentada por Cardoso e Ferreira (2004). O componente Planejador, juntamente com o componente de Gerenciamento Temporal, constitui o mecanismo de raciocínio do agente Planejador de Operações de Vôo.

Outros trabalhos podem ser desmembrados a partir deste trabalho, como por exemplo o projeto e a implementação do agente Planejador de *Payload* e do agente Executor/Monitor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cardoso, L. S.; Ferreira, M. G. V. **Aplicação da tecnologia de agentes de planejamento nas operações de satélites**. Proposta de dissertação de mestrado, INPE, ago 2004.
- Chien, S.; Rabideau, G.; Knight, R.; Sherwood, R.; Engelhardt, B.; Mutz, D.; Estlin, T.; Smith, B.; Fisher, F.; Barrett, T.; Stebbins, G.; Tran, D. ASPEN – automated planning and scheduling for space mission operations. In: The Space Operations 2000 Conference, 2000. Toulouse, France. **Proceedings of the Space Operations 2000 Conference**. Toulouse: CNES, 2000. p. 1-10. 1 CD-ROM.
- Coddington, A. A continuous planning framework with durative actions. In: Ninth International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME'02), 2002. **Proceedings of the Ninth International Symposium on Temporal Representation and Reasoning**. IEEE Computer Society, 2002. p. 108-114. Disponível na biblioteca digital da IEEE Computer Society: <<http://ieeexplore.ieee.org>>. Acesso em: 06 jul. 2005.
- ECSS-E-70 Part 1A. **Space engineering: ground systems and operations. Part 1: principles and requirements**. ESA Publications Division, Netherlands, April, 2000.
- Elder, C. E.; Payne, A. V. RADARSAT-2 planning system. In: The Space Operations 2004 Conference, 2004. Montreal, Canada. **Proceedings of the Space Operations 2004 Conference**. Montreal: CSA, 2004. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.aiaa.org/Spaceops2004Archive>>. Acesso em: 06 jul. 2005.
- Ercolani, A.; Ferri, P.; Simonic, A.; Kowalczyk, A; Ulriksen, T. Operations automation for Rosetta mission. In: The Space Operations 2004 Conference, 2004. Montreal, Canada. **Proceedings of the Space Operations 2004 Conference**. Montreal: CSA,

2004. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.aiaa.org/Spaceops2004Archive>>. Acesso em: 06 jul. 2005.

Ferber, J. **Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence**. London: Addison-Wesley, 1999. 509 p.

Ferri, P.; Pecchioli, M.; Pena, A. Introducing automation in ground segment operations. In: The Space Operations 2004 Conference, 2004. Montreal, Canada. **Proceedings of the Space Operations 2004 Conference**. Montreal: CSA, 2004. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.aiaa.org/Spaceops2004Archive>>. Acesso em: 06 jul. 2005.

Fikes, R. E.; Nilson, N. J. STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem-solving. **Artificial Intelligence**, v. 2, n. 3-4, p. 189-208, 1971.

Gilbert, D. Intelligent agents: the right information at the right time. IBM Intelligent Agent White Paper, IBM Corporation, 1997. Disponível em: <<http://maya.cs.depaul.edu/~classes/cs480/papers/ibm-iagt.pdf>>. Acesso em: jul. 2005.

Harris, W.; Blake, R; Woods, D.; Thompson, R. Mission planning for constellations. In: The Space Operations 2002 Conference, 2002. Houston, Texas. **Proceedings of the Space Operations 2002 Conference**. Houston: NASA, 2002. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.aiaa.org/Spaceops2002Archive>>. Acesso em: 06 jul. 2005.

Larson, W. J.; Wertz, J. R. **Space mission analysis and design**. 2 ed., Torrance and Dordrecht: Microcosm, Inc. and Kluwer Academic Publishers, 1996. 865p.

Lieberman, H. Autonomous interface agents. In: Conference on Human Factors in Computing Systems, 1997. Atlanta, U.S.A. **Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 97)**. Atlanta: ACM/SIGCHI, 1997. Disponível em: < <http://www.acm.org/sigchi/chi97/proceedings/paper/index.html>>. Acesso em: 06 jul. 2005.

Maes, P. Artificial life meets entertainment: lifelike autonomous agents. **Communications of the ACM**, v. 38, n. 11, p. 108-114, 1995.

Monham, A.; Rudolph, A.; Bargellini, P.; Heinen, W. A controlled approach to automated operations. In: The Space Operations 2004 Conference, 2004. Montreal, Canada. **Proceedings of the Space Operations 2004 Conference**. Montreal: CSA, 2004. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.aiaa.org/Spaceops2004Archive>>. Acesso em: 06 jul. 2005.

Russell, S.; Norvig, P. **Artificial intelligence: a modern approach**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

Russell, S.; Norvig, P. **Inteligência artificial**. Tradução da 2ª edição, Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

Sycara, K. P. The many faces of agents. **Artificial Intelligence Magazine**, v. 19, n. 2, p. 11-12, 1998.

Weiss, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed modern approach to artificial intelligence**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1999.

Wooldridge, M.; Jennings, N. R. **Intelligent agents: theories, architectures and languages**. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1995.