

# Verificação de planos de operações de satélites via simulador baseado em regras

Jun Tominaga<sup>1</sup>, José Demísio S. da Silva<sup>2</sup>, Maurício Gonçalves V. Ferreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Rastreo e Controle de Satélites (CRC) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brazil

<sup>2</sup>Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brazil

jun@ccs.inpe.br, demisio@lac.inpe.br, mauricio@ccs.inpe.br

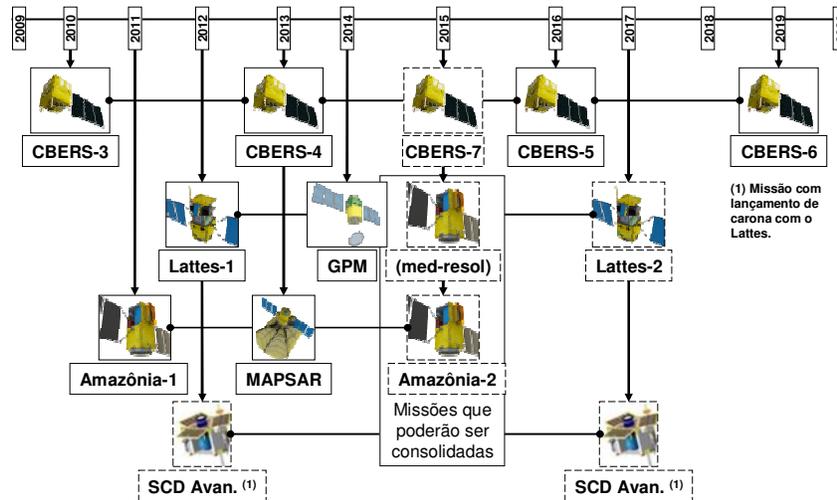
***Abstract.** INPE Satellite Tracking Control Center (CRC) performs satellite operations planning. With new missions, the number of operating satellites tends to increase. New tools are being developed to fulfill this demand, but must be validated before use. The development of architecture for rule-based satellite simulators is proposed, to verify whether operations plans generated by new tools are safe or not. In these new simulators, at each simulation step, internal states are updated by a system based on control rules. The set of these rules originates from the knowledge of experts on satellites and their operations, thus constituting an expert system.*

***Resumo.** O Centro de Rastreo e Controle de Satélites do INPE (CRC) realiza planejamento de operações de satélites. Com as novas missões, o número de satélites em operação tende a aumentar. Novas ferramentas estão sendo desenvolvidas para atender a esta demanda, mas precisam ser validadas antes de seu uso. É proposto o desenvolvimento de uma arquitetura para simuladores de satélites baseada em regras, para verificar se planos de operações gerados pelas novas ferramentas são seguros ou não. Nestes simuladores, a cada passo de simulação estados internos são atualizados por meio de um sistema baseado em regras de controle. O conjunto destas regras tem origem no conhecimento de especialistas de satélites e de operações, constituindo um tipo de sistema especialista.*

## 1. Contextualização do problema

O CRC controla atualmente quatro satélites, SCD1, SCD2, CBERS-2 e CBERS-2B, por meio de duas estações terrenas de rastreo, uma em Cuiabá, MT, e outra em Alcântara, MA. Acordos de cooperação internacionais estão sendo firmados para novos satélites, de forma a dividir tanto custos de desenvolvimento quanto retornos de investimento. Centros de missão procuram atender a demandas de um número crescente de usuários, ao passo que usos abusivos dos equipamentos embarcados devem ser evitados. Novas tecnologias adicionam cada vez mais recursos aos equipamentos de carga-útil, o que contribui para o aumento de complexidade em suas operações. Encontram-se atualmente em desenvolvimento projetos objetivando a automação do planejamento de operações no CRC, utilizando técnicas de inteligência artificial. Porém há uma resistência,

justificável, por parte do pessoal responsável pelo planejamento de operações, em utilizar estes planejadores para operações de controle de satélites reais, sem antes testá-los exaustivamente.



**Figura 1. Cronograma de lançamento de satélites do INPE (adaptado de [Câmara 2008])**

A fim de se aumentar a confiabilidade do sistema de planejamento de operações, é proposta a adoção de uma ferramenta de verificação de planos. Esta ferramenta consiste num simulador de estados internos de satélites. O simulador é alimentado com planos de operações em voo de modo a simular, a priori, a execução de atividades de controle nos horários programados. Os estados internos do simulador refletem, passo a passo, os efeitos da execução das atividades programadas sobre o satélite simulado. A verificação de resultados consiste no diagnóstico do histórico de estados internos simulados, com base em requisitos de operação segura do satélite, para decidir pela aceitação ou rejeição do plano de operações sob teste. Esta abordagem traz a vantagem de permitir a detecção a priori de anomalias em satélites, que seriam causadas por planos de operações em voo com erros, caso as atividades programadas viessem a ser executadas.

## 2. Planejamento de operações atual

Uma passagem corresponde a um intervalo de tempo contínuo dentro do qual uma estação de rastreamento consegue estabelecer um enlace de comunicação com um satélite. Atividades de controle devem ser programadas e executadas durante passagens. Estas atividades incluem monitoração de telemetrias, disparo de medidas de distância e de velocidade, e envio de telecomandos. Uma estação terrena não consegue rastrear dois satélites simultaneamente com uma mesma antena. Porém, podem ocorrer passagens simultâneas, com mais de um satélite orbitando sobre uma mesma estação terrena. Atualmente, o gerenciamento de tais conflitos é realizado por meio de alocação de prioridades a previsões de contato de satélites, e encurtamento ou eliminação de passagens consideradas de baixa prioridade.

Previsões de contato de satélites, também conhecidos como previsões de passagens (PVP), são arquivos gerados pela equipe de dinâmica de voo que contém

listas seqüenciais de passagens de um satélite sobre uma estação terrena de rastreamento. O sistema atual permite o gerenciamento de conflito de até vinte previsões de contato de satélites. Após este gerenciamento de conflitos, atribuem-se atividades de controle às passagens remanescentes. Este passo constitui a geração de arquivos de planos de operações em vôo (POV). A atribuição de atividades de controle é realizada conforme requisitos de operação pré-estabelecidos.

### **3. Simulador de satélites para verificação de planos**

Um satélite é um sistema complexo, onde há contínua interação entre os diversos equipamentos componentes. Tradicionalmente, um satélite é subdividido em subsistemas, de acordo com as funções desempenhadas. Um satélite pode conter diversos subsistemas de plataforma de serviço, que inclui suprimento de energia elétrica, comunicações de rastreamento, controle térmico, controle de atitude e órbita, gerenciamento de dados embarcados. Os subsistemas de carga-útil compreendem um ou mais instrumentos de aquisição e processamento de dados de missão, gravadores embarcados, e transmissores de dados. Cada um desses subsistemas compreende diversos equipamentos, com vários pontos de monitoração e atuação.

Esta visão tradicional de satélites traz vantagens para projetistas de missões. Especialistas de diferentes áreas de conhecimento podem concentrar seus esforços no projeto de seu subsistema particular, sem se preocupar demasiadamente com os outros subsistemas que compõem o satélite. Simuladores de satélites são construídos tradicionalmente por meio de acoplamento de modelos matemáticos desenvolvidos por estes especialistas de subsistemas, conforme é possível concluir de outros trabalhos. Os modelos matemáticos são então codificados, compilados e entregues ao usuário. ([Ambrosio et al. 2006] [Qiu et al. 2000])

Os modelos depois de codificados se tornam de difícil modificação. Portanto, esta abordagem pode não ser a mais apropriada para um projeto de simulador de satélites para verificação de planos de operações em vôo. Ao longo da vida de um satélite, falhas podem ocorrer em combinações inesperadas. O refinamento e a calibração de modelos, para refletirem os casos reais observados, podem se tornar um processo árduo e custoso, que pode se tornar ainda mais complexo, considerando-se interações entre equipamentos de diferentes subsistemas. Por causa destas dificuldades, é proposta uma arquitetura de simulador de satélite com modelamento diferente do convencional.

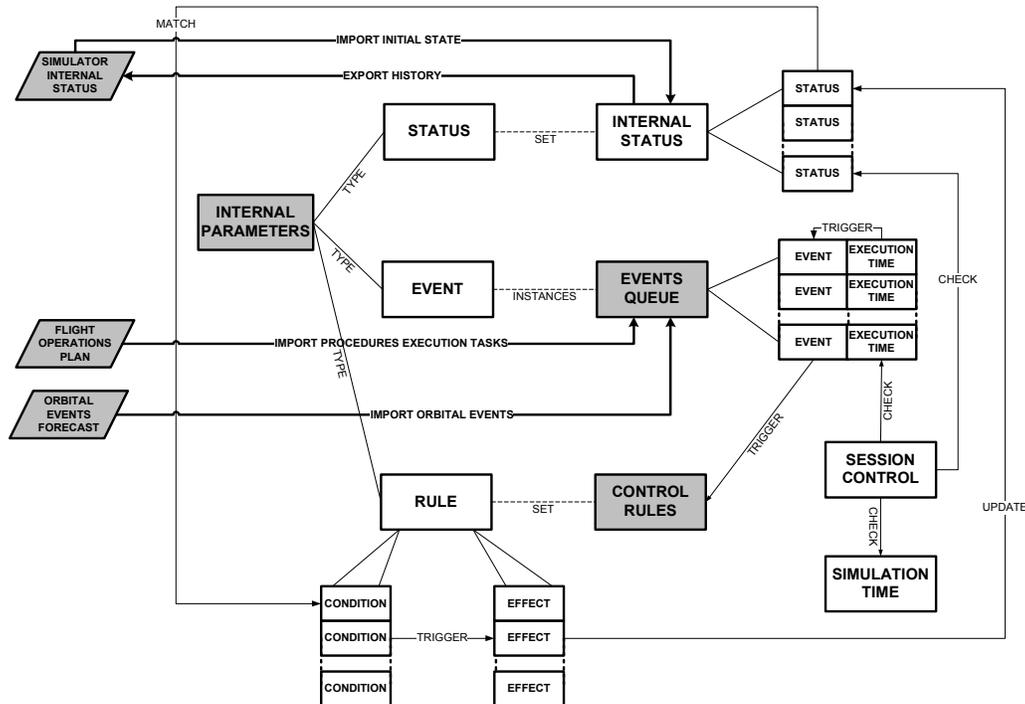
Na abordagem proposta, a modelagem é realizada por especialistas de sistema, e não de subsistema. A preocupação em refletir detalhes em nível de equipamentos e componentes é menor, comparada à capacidade de se reproduzirem efeitos de perturbações no sistema, a partir de uma condição inicial modelada de forma mais próxima da realidade corrente. Para poder refletir melhor o conhecimento de especialistas de sistema, o cadastramento do modelo é feito com base em regras, que são disparadas por condições causadas por eventos, e que causam efeitos sobre o sistema.

### **4. Estrutura interna do simulador de satélites**

O simulador de satélites constitui-se basicamente de um núcleo de processamento e um conjunto de parâmetros internos de simulação. O núcleo de processamento é genérico,

visando sua reutilização para diversos satélites. Os parâmetros internos são específicos para cada missão e devem ser cadastrados de forma independente.

Os parâmetros internos de simulação, armazenados localmente, se classificam em estados, eventos, e regras. O conjunto formado por instâncias de todos os parâmetros do tipo estado é um estado interno. Uma lista temporizada contendo instâncias de parâmetros do tipo evento forma uma estrutura denominada fila de eventos. A combinação de todos os parâmetros internos do tipo regra forma o conjunto de regras de controle.



**Figura 2. Estrutura interna do simulador (fonte [Tominaga et al 2008])**

O estado interno é composto por um conjunto de valores numéricos de parâmetros do tipo estado, que representam o status do sistema simulado em um dado instante de tempo. Perturbações no sistema, causados por disparos de eventos, levam a alterações em valores de parâmetros do estado interno. Estas alterações são registradas a cada passo de uma sessão de simulação, na forma de histórico de estados. A fila de eventos é uma lista temporizada de perturbações programadas para serem aplicadas ao sistema. Cada evento nesta fila possui um tempo de execução associado. Numa sessão de simulação, eventos na fila cujos tempos de execução correspondem ao tempo de simulação são disparados. O simulador de satélite gera a fila de eventos antes do início da sessão de simulação, a partir da leitura do plano de operações em voo e da previsão de eventos orbitais. As regras de controle descrevem perturbações que se aplicam sobre o sistema, associando condições a efeitos. A cada passo de simulação, todas as regras que compõem o conjunto de regras controle são avaliadas. Se suas condições forem satisfeitas, disparam-se efeitos, que alteram valores de parâmetros de estado do próximo estado. Antes de se renovar o passo de simulação, os efeitos de regras disparadas são

aplicados sobre o estado interno. As regras de controle são cadastradas antes do início da simulação e mantidas em banco de dados.

Uma sessão de simulação consiste em determinar sequencialmente, a partir de um estado interno inicial, novos conjuntos de valores para os parâmetros do tipo estado, que definem os estados seguintes. A cada passo de simulação, simulador de satélite armazena num histórico de estados os valores dos parâmetros internos. Os parâmetros internos do estado inicial podem ser obtidos primariamente a partir do histórico de parâmetros ou, alternativamente, de alguma outra fonte especificada pelo operador.

#### 4. Planejamento de operações com verificação via simulador

Planejadores geram arquivos de saída no formato POV. Estes planos de operações em vôo alimentam o simulador de satélites. O simulador reproduz o efeito das atividades contidas nos planos de operações em vôo sobre o estado interno modelado do satélite. A cada passo de simulação, o estado interno corrente é exportado na forma de arquivo de histórico de estados. Se as atividades não levarem o estado interno do simulador a uma condição de alarme, conclui-se que o plano de operações em vôo não irá causar problemas ao ser enviado para a execução de procedimentos. Caso contrário, o plano de operações em vôo é rejeitado e inicia-se uma análise do histórico de estados para diagnóstico de erros. Além do plano de operações em vôo, o simulador recebe da dinâmica de vôo arquivos de previsão de eventos orbitais. Aqui se encontram informações adicionais que são externos ao satélite, mas que afetam seu estado interno.

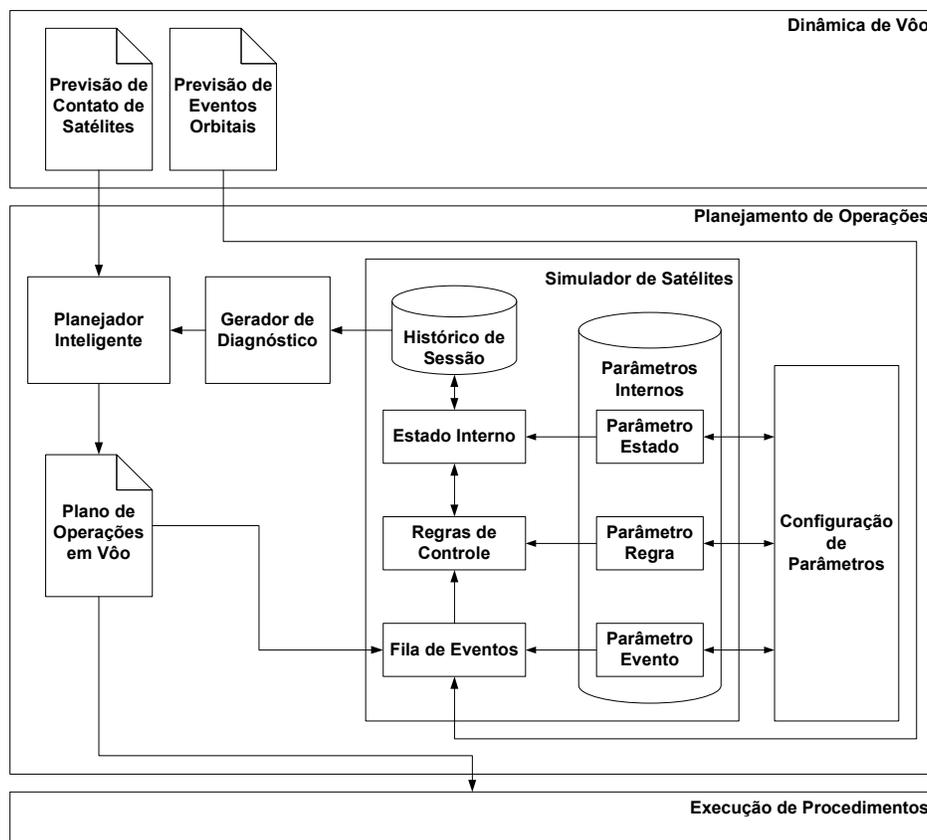


Figura 3. Arquitetura de planejamento de operações e verificação por simulador

Ao final de uma sessão de simulação, obtém-se um histórico de estados de toda a sessão. O gerador de diagnóstico lê este histórico de estados e gera um parecer de aceitação ou rejeição do plano de operações em vôo. Os estados internos são comparados com um conjunto de referências que define valores limites de parâmetros que devem ser respeitados para uma operação segura. Caso ocorra rejeição, um diagnóstico do histórico de estados é realizado a fim de identificar eventos na fila de eventos que causaram anomalia. O gerador de diagnósticos utiliza o histórico de estados para determinar quais eventos na fila de eventos do simulador foram relevantes para se chegar ao estado interno final, a partir de um estado interno de referência. Ele realiza um mapeamento de estados para avaliar como o estado final com anomalia pode deixar de ser atingido por eliminação seletiva de eventos na fila de eventos. O simulador de satélites é invocado para executar novas sessões de simulação, utilizando estas filas de eventos modificadas. Planos de operações que contenham atividades traduzidas das filas de eventos e que resultem em estados finais sem anomalia correspondem a alternativas viáveis que podem ser executadas.

## **5. Conclusão**

O uso de um simulador de satélites para verificação de planos de operação em vôo adiciona um nível de segurança a mais à execução de procedimentos em vôo de satélites. Esta abordagem atende de forma adequada as necessidades de planejadores de operações em vôo de satélites, que se vêem obrigados a substituírem ferramentas de trabalho antiquadas, porém validadas por anos de uso, por novas e mais poderosas ferramentas que, no entanto, não lhe são confiáveis.

A modelagem proposta para este simulador de satélites é a de um sistema especialista baseado em regras. Estes sistemas especialistas utilizam regras de inferência para a resolução ou o diagnóstico de problemas. As regras ditam ações a serem tomadas, a partir de condições em conformidade com o conhecimento do sistema, para se atingir o efeito desejado. Este conhecimento é de responsabilidade de especialistas do sistema, que estabelecem as regras. O simulador proposto realiza este processo a cada passo de sessão de simulação. O estado interno corrente e eventos disparados fornecem os antecedentes. Os conseqüentes são refletidos no próximo estado interno. Os parâmetros internos do simulador, incluindo estados, eventos e regras, devem ser devidamente configurados por um ou mais especialistas de sistema antes de seu uso. Esta arquitetura possibilita a implementação de simuladores para diferentes satélites, em diferentes modos de operação. Normalmente, durante o desenvolvimento do simulador, são levados em consideração apenas cenários e modos de operação vislumbrados por projetistas. Entretanto, anomalias podem ocorrer em combinações inesperadas, e modos de operação podem diferir bastante daquelas inicialmente previstas. Este simulador permite a adaptação de parâmetros internos e a inclusão de novas regras de controle conforme a necessidade.

## **Referências**

Ambrosio, A. M., Cardoso, P. E., Bianchi Neto, J. (2006) "Brazilian satellite simulators: previous solutions trade-off and new perspectives for the CBERS program", 9<sup>th</sup> International Conference on Space Operations, Rome, Italy.

- Câmara, G. (2008) “INPE 2008-2010”, INPE, São José dos Campos, Brazil.  
[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/present/inpe\\_2008\\_2010.ppt](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/present/inpe_2008_2010.ppt).
- Tominaga, J., Silva, J. D. S., Ferreira, M. G. V. (2008) “A Proposal for Implementing Automation in Satellite Control Planning”, SpaceOps 2008, Heidelberg, Germany.
- Qiu, H., Huang, F., Wu, Y., Cardoso, P. E., Kuga, H. K., Orlando, V., Yamaguti, W., Rozenfeld, P., Li, J., Santana, C. E., Chen, Y. (2000) “CBERS simulator software design documents”, São José dos Campos, Brazil.