

MFN= 010681

01 SID/SCD

02 9577

03 INPE-9577-PRE/5207

04 ETES

05 MC

06 am

10 Orlando, Valcir

12 Controle de satélite no INPE

18 Anais

53 Escola de Verão em Dinâmica Orbital e Planetologia, 6

54 <2002>

56 Guaratinguetá

58 CRC

61 <CN>

64 <2002>

68 PRE

76 ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAL

83 É apresentada uma visão geral das atividades de rastreamento e controle em órbita de satélites artificiais no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Inicia-se com uma breve descrição da infra-estrutura de solo desenvolvida para dar suporte a estas atividades. Em seguida é apresentada uma descrição mais detalhada do Sistema de Dinâmica Orbital do Centro de Controle de Satélites responsável pelas funções de análise de missão, determinação e propagação de órbita e atitude e previsão e cálculo de manobras. A seguir aborda-se o satélite SCDI (lançado em 9 de fevereiro de 1993) sua missão de coleta de dados ambientais, seu desempenho e as principais atividades relacionadas ao seu controle em órbita. Novos satélites do INPE foram lançados recentemente. O primeiro deles, o SCD2 foi lançado com sucesso, em 22 de outubro de 1998, pelo lançador americano Pégasus, assegurando a continuidade da Missão de Coleta de Dados Ambientais. Iniciada com o SCDI, esta missão conta hoje com uma vasta rede de plataformas automáticas de coleta de dados espalhadas pelo território nacional que integram, juntamente com o Centro de Controle de Missão, o chamado Sistema de Coleta de Dados Ambientais. Dados sobre, o funcionamento e operação deste sistema são apresentados, ressaltando-se sua grande expansão, desde o lançamento do SCDI até os dias atuais. tanto em termos de diversidade de aplicações (usuários), quanto em termos de quantidade de plataformas instaladas e em fase de instalação ou de aquisição. Os principais eventos da fase inicial de operação do SCD2 e suas principais características de desempenho são discutidos no trabalho. As principais diferenças existentes entre o SCD2 e o SCDI são comentadas, enfatizando-se seus reflexos nas atividades de controle do SCD2. Em 14 de outubro de 1999 foi lançado pelo lançador chinês Longa Marcha o satélite Sino-Brasileiro de observação da Terra CBERS-1, (estabilização autônoma de atitude em três eixos e órbita heliosíncrona) com aproximadamente 1.540 kg de massa, desenvolvido em acordo de cooperação entre o Brasil e a China. Após uma fase inicial de aquisição de atitude e órbita e de realização de testes de aceitação em órbita este satélite encontra-se atualmente em fase operacional de rotina.

87 satélite artificiais

87 SCD 1

87 SCD 2

87 CBERS 1

87 estação de rastreamento

# CONTROLE DE SATÉLITES NO INPE

Valcir Orlando

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas, 1758 - CP 515  
12201-970 - São José dos Campos, SP, BRASIL  
Telefone: (012) 325-6374, Fax: (012) 341-1873  
E-Mail: valcir@gama.ccs.inpe.br

É apresentada uma visão geral das atividades de rastreamento e controle em órbita de satélites artificiais no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Inicia-se com uma breve descrição da infra-estrutura de solo desenvolvida para dar suporte a estas atividades. Em seguida é apresentada uma descrição mais detalhada do Sistema de Dinâmica Orbital do Centro de Controle de Satélites, responsável pelas funções de análise de missão, determinação e propagação de órbita e atitude e previsão e cálculo de manobras. A seguir aborda-se o satélite SCD1 (lançado em 9 de fevereiro de 1993) sua missão de coleta de dados ambientais, seu desempenho e as principais atividades relacionadas ao seu controle em órbita. Novos satélites do INPE foram lançados recentemente. O primeiro deles, o SCD2 foi lançado com sucesso, em 22 de outubro de 1998, pelo lançador americano Pégasus, assegurando a continuidade da Missão de Coleta de Dados Ambientais. Iniciada com o SCD1, esta missão conta hoje com uma vasta rede de plataformas automáticas de coleta de dados espalhadas pelo território nacional, que integram, juntamente com o Centro de Controle de Missão, o chamado Sistema de Coleta de Dados Ambientais. Dados sobre o funcionamento e operação deste sistema são apresentados, ressaltando-se sua grande expansão, desde o lançamento do SCD1 até os dias atuais, tanto em termos de diversidade de aplicações (usuários), quanto em termos de quantidade de plataformas instaladas e em fase de instalação ou de aquisição. Os principais eventos da fase inicial de operação do SCD2 e suas principais características de desempenho são discutidos no trabalho. As principais diferenças existentes entre o SCD2 e o SCD1 são comentadas, enfatizando-se seus reflexos nas atividades de controle do SCD2. Em 14 de outubro de 1999 foi lançado pelo lançador chinês Longa Marcha o satélite Sino-Brasileiro de observação da Terra CBERS-1, (estabilização autônoma de atitude em três eixos e órbita heliosíncrona) com aproximadamente 1.540 kg de massa, desenvolvido em acordo de cooperação entre o Brasil e a China. Após uma fase inicial de aquisição de atitude e órbita e de realização de testes de aceitação em órbita este satélite encontra-se atualmente em fase operacional de rotina.

As primeiras imagens do Brasil, região amazônica, geradas por um de seus instrumentos óticos (o "Wide Field Scanner", desenvolvido sob a responsabilidade do Brasil), foram adquiridas e processadas ainda na fase inicial, demonstrando um desempenho satisfatório do referido instrumento. A primeira imagem gerada do WFI encontra-se disponível na página Web do INPE (<http://www.inpe.br>). Os futuros satélites planejados pelo INPE e suas principais características são apresentados e comentados.

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades de controle em órbita de satélites no INPE (Orlando, 1998) são planejadas e desenvolvidas no Centro de Rastreamento e Controle de Satélites (CRC), que engloba o Centro de Controle de Satélites (CCS) e duas estações de rastreamento (Rozenfeld et al., 1994). Atualmente dois satélites estão sendo controlados pelo CRC: o SCD1, primeiro satélite desenvolvido pelo INPE, que hoje, após quase seis anos de seu lançamento, continua a apresentar excelentes características de desempenho, e o SCD2, satélite similar, lançado em outubro de 1998 pelo lançador norte-americano Pégasus. Além destes dois satélites há o satélite sino-brasileiro CBERS1, lançado em outubro de 1999, cujo controle durante o primeiro ano em órbita é responsabilidade chinesa. A partir de março de 2001 o controle total do satélite passará ao Brasil, por um período de 6 meses. O CRC atualmente controla apenas os instrumentos que compõem a carga útil do satélite, durante os sucessivos períodos de visibilidade deste à estação de Cuiabá. As imagens dos instrumentos óticos são recebidas por uma antena específica de Cuiabá e posteriormente processadas em Cachoeira Paulista, sob a responsabilidade da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do INPE.

Na seção 2 é apresentada uma breve descrição do sistema de solo desenvolvido para o controle de satélites do INPE. Uma descrição do Sistema de Dinâmica Orbital do Centro de Controle de Satélites (CCS), com ênfase em suas principais funções e interfaces é apresentada na seção 3. A seção 4 é dedicada ao satélite SCD1, destacando-se a finalidade de sua missão e seu desempenho. Na seção 5 descreve-se o Sistema de Coleta de dados, onde é abordada a sua evolução, desde seu início de operação, com o lançamento do SCD1, até os dias atuais. O lançamento do SCD2 é enfocado na seção 6, enfatizando-se os principais eventos desta fase e as principais ações de controle executadas (Rozenfeld et al., 1999). Na seção 8 comenta-se o lançamento do CBERS1, suas principais características, e os principais aspectos das atividades de rastreamento deste satélite pelo INPE. O trabalho é concluindo com uma visão geral dos próximos satélites em desenvolvimento no INPE.

## 2. SISTEMA DE CONTROLE DE SOLO

O sistema de solo desenvolvido para o controle de satélites do INPE e sua estrutura funcional compõem o formalmente denominado Centro de Rastreamento e Controle de Satélites (CRC). O CRC é constituído pelo Centro de Controle de Satélites (CCS), localizado em São José dos Campos, SP, pela estação de rastreamento de Cuiabá em Mato Grosso, e pela estação de rastreamento de Alcântara, no Maranhão. Estes três locais são conectados entre si por uma rede privada de comunicação de dados denominada RECDAS. A localização geográfica da estação de Cuiabá, próximo ao centro geométrico da América do Sul, possi-

bilita a cobertura de praticamente todo o seu território. Quanto a estação de Alcântara, por estar localizada nas vizinhanças do Centro de Lançamento de Alcântara, permite o rastreamento desde o instante de injeção em órbita, de satélites lançados a partir deste centro.

O contato com o satélite é estabelecido pelas estações de rastreamento quando este passa sobre a região de visibilidade de suas antenas. Durante períodos de visibilidade o sinal transmitido pelo satélite é captado pela antena da estação, ficando estabelecido um enlace descendente de comunicação entre o satélite e o solo. O sinal recebido do satélite contém as informações de telemetria que revelam seu estado atual de funcionamento. Após o estabelecimento do enlace descendente, a estação estabelece também um enlace ascendente, que é utilizado para envio de comandos e execução de medidas de localização (medidas de distância e do desvio Doppler de frequência).

Todas as ações de controle são planejadas, coordenadas e executadas a partir do CCS. Durante os citados períodos de visibilidade de satélites, o CCS conecta-se à estação de rastreamento, através da RECDAS, ficando habilitado a receber dados do veículo espacial e transmiti-los a esta, em tempo real. O CCS assume, deste modo, o controle do satélite, realizando as funções de monitoração da telemetria recebida, de envio de comandos ao satélite e de disparar a execução de sessões de medidas da distância entre a estação de rastreamento e o satélite. Estas operações são executadas com auxílio do software aplicativo de tempo real do CCS, denominado SICS (Sistema de Controle de Satélites), residente em um sistema computacional DEC AXP 2100/M4-200. Para os satélites CBERS foi desenvolvido um novo software aplicativo de tempo real (equivalente ao SICS) em linguagem Visual C++, desta vez sob plataformas PC. Outro grande pacote de software aplicativo do CCS, também residente em sistema DEC AXP 2100/M4-200, é o chamado Sistema de Dinâmica Orbital (DINOR), que, ao contrário do SICS opera em tempo não real, a partir de arquivos históricos de missão, que contém dados de telemetria e medidas de rastreamento do satélite, gravados pelo SICS durante as passagens dos satélites sobre as estações de rastreamento. Estas medidas são utilizadas no processo de determinação de órbita (Kuga et al., 1993), através do qual o conhecimento da órbita do satélite é periodicamente atualizado e mantido dentro de requisitos preestabelecidos de precisão. Os resultados da determinação de órbita servem de entrada ao processo de propagação de órbita. Este último, com auxílio de modelos dinâmicos do movimento, gera estimativas de valores futuros do estado orbital do satélite. Estas estimativas permitem o cálculo de previsões de dados necessários ao rastreamento de futuras passagens do satélite sobre as estações de rastreamento. Os dados para apontamento de antena, calculados neste processo, são suficientemente precisos para garantir a pronta aquisição do sinal do satélite em passagens que só ocorrerão vinte dias após sua geração.

### 3. SISTEMA DE DINÂMICA ORBITAL

A Figura 1 ilustra as funções básicas e o modo de operação do sistema de dinâmica orbital desenvolvido para o centro de controle de satélites do INPE (Orlando et al., 1997).

O sistema opera em tempo não real a partir de medidas dos sensores de atitude do satélite (sensores solares e magnetômetro, no caso dos satélites de coleta de dados,

amostrados à taxa de 2 medidas por segundo) e de medidas de distância, recuperadas dos arquivos históricos da missão. Os dados contidos nestes arquivos cobrem o período integral da missão. Neles são automaticamente armazenados, durante passagens do satélite, todos os dados de telemetria recebidos, todos os telecomandos enviados, e todas as medidas de distância executadas. O armazenamento é feito automaticamente por um outro sistema importante do CCS, o software aplicativo de tempo real.

Existem dois processos básicos executados pelo sistema de dinâmica orbital: determinação de órbita e determinação de atitude. Ambos os processos possuem rotina semanal de execução.

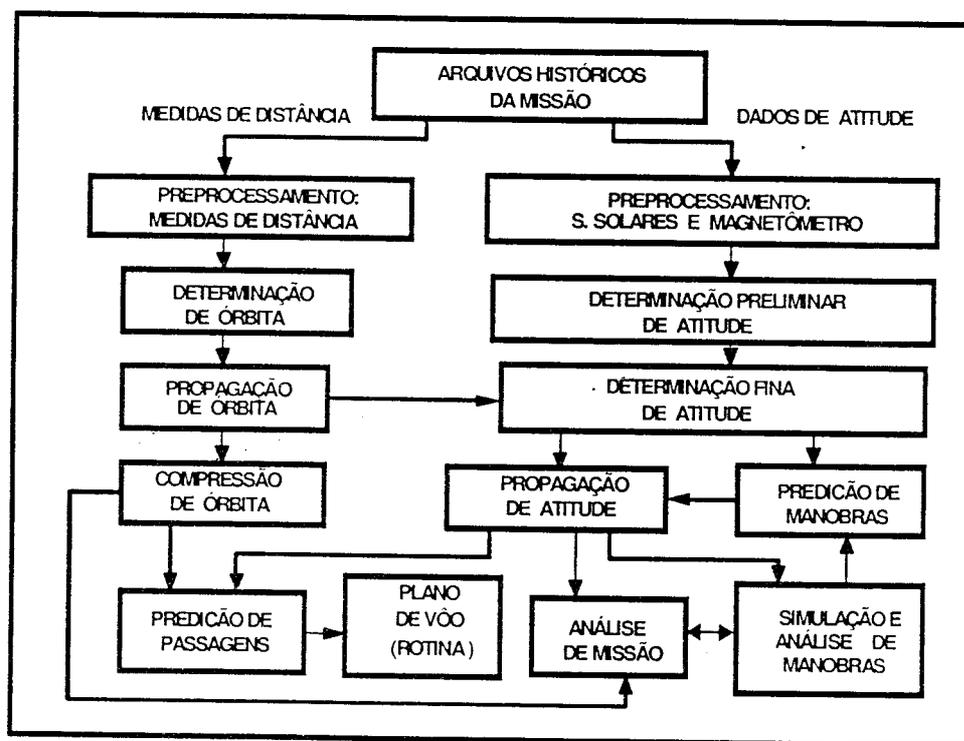


Figura 1: Sistema de Dinâmica Orbital do CCS.

A determinação de órbita é executada em duas etapas básicas: o pré-processamento de dados e a estimação de órbita. O pré-processamento consiste de uma preparação inicial dos dados, através de aplicação, a estes, de procedimentos de validação, compressão, calibração e conversão a unidades de engenharia. A estimação de órbita, por sua vez, aplica aos dados pré-processados um procedimento de estimação de mínimos quadrados de modo a obter a melhor órbita que a eles se ajusta. O modelo de forças considerado neste processo compreende os seguintes efeitos: geopotencial, ajustáveis à ordem e graus desejados; arrasto atmosférico; pressão de radiação e atração luni-solar; precessão; nutação; movimento polar; refração atmosférica (troposférica e ionosférica) e atrasos de propagação.

O processo de determinação de atitude compreende as etapas de pré-processamento de dados, determinação preliminar de atitude e determinação fina de atitude. O pré-processamento

mento é aplicado isoladamente a cada conjunto de dados dos sensores de atitude coletado em cada uma das passagens do satélite ocorridas na semana anterior. Neste processo os dados coletados em cada passagem são reduzidos a  $n$  estimativas do ângulo entre o eixo de rotação e o vetor campo geomagnético ( $n$  é o número de conjuntos consecutivos de 32 medidas geradas na passagem); uma estimativa do ângulo de aspecto solar e uma estimativa da velocidade de rotação do satélite.

A determinação preliminar de atitude tem como entrada os resultados do processamento. Sua saída consiste de uma estimativa do vetor velocidade angular do satélite para cada intervalo de visibilidade à estações de rastreamento. Seus resultados, que cobrem o período de uma semana, são utilizados pelo processo de determinação fina de atitude. Este gera uma estimativa refinada do vetor velocidade angular, uma estimativa do momento magnético residual do satélite (principal causa da precessão do eixo de rotação), e uma estimativa do parâmetro de Foucault (principal causa do amortecimento da rotação). Estas estimativas, são substituídas nas equações dinâmicas utilizadas no processo de propagação de atitude, de modo a incrementar a precisão de seus resultados.

Tanto o processo de propagação de órbita quanto o de atitude mantém arquivos de dados previstos que abrangem, além de todo o período passado da missão, um período futuro de três meses. Estes dados são utilizados para a geração, a cada três semanas, de relatório de previsão de passagens para o rastreamento e controle do satélite. Adicionalmente, este relatório serve de entrada para um software que gera, automaticamente, o plano de operação em voo a ser seguido em cada uma das passagens futuras contidas na previsão. O plano de voo contém todas as ações de controle a serem executadas em cada passagem: telecomandos a serem enviados, telemetrias a serem monitoradas e medidas de distância a serem executadas, por exemplo.

#### 4. O SATÉLITE SCD1

O satélite SCD1 é o primeiro satélite projetado, construído e operado em órbita no INPE. Lançado em 9 de fevereiro de 1993 às 14:42:20 UTC, pelo lançador norte-americano Pégasus, foi injetado em uma órbita circular de aproximadamente 750 km de altitude e 25 graus de inclinação em relação ao plano do Equador (Orlando, 1994; Rozenfeld et al., 1996). Apresenta até o momento, praticamente 7 anos após expirar-se o seu tempo de vida nominal estimado, que era de apenas 1 ano, uma surpreendente condição de desempenho global. Sua missão é retransmitir, em direção a uma estação receptora (ET de Cuiabá), os dados coletados por uma rede de Plataformas automáticas de Coleta de Dados (PCDs) ambientais distribuídas ao longo de praticamente todo o território nacional (Yamaguti et al., 1994). Quando o satélite passa sobre a região de visibilidade da estação de rastreamento de Cuiabá, os sinais das PCDs que se encontram visíveis ao satélite são captados e retransmitidos à estação. Na estação os dados recebidos são gravados e, após a passagem do satélite, transmitidos ao Centro de Controle de Missão, em Cachoeira Paulista, onde são processados e distribuídos aos usuários para análise. Atualmente também a estação de Alcântara, no Maranhão, encontra-se equipada para receber os sinais de PCDs retransmitidos pelo satélite.

O SCD1 é estabilizado por rotação (120 rotações por minuto logo após a injeção em órbita). Possui o formato de um prisma octogonal do qual apenas a face inferior não é recoberta por células solares. Esta face é usada, pelo subsistema de controle térmico, para dissipação de calor. Por este motivo a incidência direta de luz solar nessa face não deve ocorrer, a fim de evitar possíveis problemas térmicos que poderiam danificar equipamentos do satélite. Para que isto não ocorra, ângulo de aspecto solar ( $\theta$ ), isto é, o ângulo entre a direção de incidência dos raios solares e o eixo de rotação do satélite (eixo longitudinal) deve ser menor que  $90^\circ$ . Por outro lado, a realização de uma análise térmica do satélite, logo após seu lançamento, revelou que poderia ocorrer um aquecimento excessivo da carga útil do satélite, se  $\theta$  atingisse valores inferiores a 60 graus. Considerando este vínculo adicional, a faixa de variação de  $\theta$  ficou restrita a:  $60^\circ < \theta < 90^\circ$ . Para manter  $\theta$  dentro desta faixa são executadas manobras de controle de atitude sempre que o valor deste ângulo se aproxima de um dos valores limites. Os torques de controle são produzidos à bordo pela ativação (por telecomando emitidos de solo) de uma bobina magnética do subsistema de controle de atitude do satélite. A ativação desta bobina gera um momento magnético, cuja interação com o campo geomagnético produz um torque que atua no sentido de redirecionar o eixo de rotação do satélite.

A determinação, em solo, da atitude atual do SCD1, é feita a partir de medidas geradas a bordo pelos seus sensores de atitude: dois sensores solares (que fornecem medidas diretas de  $\theta$ ) e um magnetômetro de três eixo (cujas medidas são componentes do vetor campo geomagnético em um referencial fixo ao satélite). Estas medidas são transmitidas ao solo por telemetria, onde são processadas pelo software de determinação de atitude do CCS (Lopes et al., 1994).

A rede de Plataformas de Dados Ambientais implantada, que, ao início de operação do SCD1 consistia de pouco mais de 20 plataformas, sofreu, graças ao excelente desempenho do satélite, uma grande expansão, tanto em número de plataformas quanto em termos de aplicações, mostrando um crescente interesse dos usuários nos serviços providos. Atualmente a rede é constituída por cerca de 371 plataformas em operação e 267 em fase de aceitação e outras 121 em fase de aquisição. O número de PCDs apresentou, portanto, um crescimento da ordem de 18 vezes o valor inicial, considerando-se apenas o número de plataformas em operação. O número total de PCDs (considerando-se tanto as em estado operacional, quanto aquelas em fase de aceitação/instalação, e de planejamento/aquisição) é da ordem de 760 plataformas, ou seja, 38 vezes o número inicial de plataformas. As PCDs que compõe a rede abrangem um grande número de aplicações, envolvendo áreas como a meteorologia, hidrologia, planejamento agrícola, geomagnetismo, química da atmosfera, monitoramento de marés e estudos de regeneração da floresta tropical, principalmente.

Apesar do SCD1 estar ainda hoje apresentando um desempenho satisfatório, com uma enorme sobrevida, quando de seu lançamento este satélite era considerado apenas experimental quando de seu lançamento. Graças ao excelente desempenho apresentado, tornou-se um satélite operacional, tendo cumprido amplamente os objetivos para os quais foi concebido. A continuidade do Programa de Coleta de Dados Ambientais, da qual

depende hoje o projeto de um grande número de usuários, exigia, portanto, o lançamento de um novo satélite de coletas de dados para substituir o SCD1. Isto foi assegurado com o lançamento, em 22 de outubro de 1998 do SCD2, segundo satélite brasileiro desenvolvido pelo INPE.

## 5. O SATÉLITE SCD2

O SCD2, segundo satélite de coleta de dados ambientais desenvolvido pelo INPE, foi lançado em 22 de Outubro de 1998, pelo lançador americano Pegasus, fabricado pela OSC ("Orbital Sciences Corporation"), o mesmo que colocou em órbita o SCD1 em fevereiro de 1993. Este veículo possui um conceito inovador em termos de lançamento de satélites. É transportado fixo a um avião até um determinado ponto onde é liberado. Após alguns segundos de queda livre seus propulsores são acionados, iniciando-se o lançamento. O avião L-1011 que transportava o Pegasus com o SCD2, decolou da Base de Cabo Canaveral, na Flórida, às 21:05 horas (horário de Brasília). Sobre o Atlântico, 57 minutos após a decolagem, o lançador Pegasus com o SCD2 foi liberado do avião. O disparo do primeiro estágio ocorreu 5 segundos após a liberação do foguete. Exatamente às 22:12:57 (aproximadamente 11 minutos após o disparo), ocorreu a separação entre o satélite e o último estágio do lançador, concluindo com êxito o lançamento do SCD2, garantindo assim seqüência do Programa de Coleta de Dados Ambientais. A Figura 2 apresenta o traço da primeira órbita do SCD2, a partir de seu ponto de injeção.

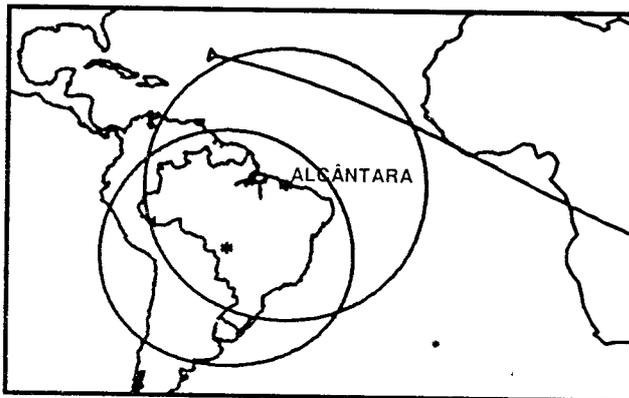


Figura 2: Injeção em Órbita do SCD2

Aproximadamente 12 segundos após a separação entre o satélite e o terceiro estágio do lançador, o SCD2 entrou no círculo de visibilidade de Alcântara (ver Figura 2), cuja antena imediatamente captou o seu sinal, o que indicava que o transmissor de serviço do satélite que devia ser automaticamente ativado durante a separação, realmente o foi. A estação passou então a dispor da telemetria do satélite, visualizada em tempo real também no Centro de Controle, em São José dos Campos. A telemetria recebida indicava que o satélite não apresentava qualquer problema de desempenho. Os sensores solares do satélite foram ligados nesta primeira passagem por Alcântara.

O lançamento do SCD2 ocorreu com muita fidelidade em relação ao que havia sido planejado. O satélite foi injetado em uma órbita com altitude média da ordem de 760

km, bastante próxima da nominal, conforme pode ser verificado comparando os valores dos parâmetros orbitais nominais e reais, apresentados na Tabela 1.

Elementos Orbitais	Nominais	Reais
Semi-eixo Maior (metros)	7133893	7128550
Excentricidade	0,000756	0,000023
Inclinação (graus)	24,987	25,001
Ascensão Reta do Nodo Ascendente (graus)	219,912	219,774
Argumento do Perigeu (graus)	348,543	291,050
Anomalia Média (graus)	124,478	183,595
Instante de Injeção (horário de Brasília)	23/10/98 22:12:1,12	23/10/98 22:12:57

Tabela 1: Elementos Orbitais Nominais e Reais do SCD2

As informações sobre o estágio orbital do satélite, que deveriam ser fornecidas pela OSC, 30 minutos após a separação entre o satélite e o último estágio do lançador foram recebidas pelo INPE apenas 5 minutos após o citado evento. Estas informações revelaram-se precisas. Utilizando-as como condição inicial foi gerado um conjunto de previsões de ângulos de apontamento para as antenas de Alcântara e Cuiabá. Com auxílio destas previsões de passagens, não houve qualquer problema de captação do sinal do satélite nas duas passagens seguintes por Alcântara e na primeira por Cuiabá. Daí por diante, os resultados do procedimento de determinação de órbita foram sendo, após cada passagem, sucessivamente refinados, já dispondo de precisão suficiente para que as previsões de passagens para as estações de rastreamento pudessem ser atualizadas. Ao final da primeira seqüência de passagens visíveis do SCD2, a órbita já estava satisfatoriamente determinada e a aplicação dos procedimentos de dinâmica orbital já seguia rotina similar à do SCD1 (Kuga et al., 1999)

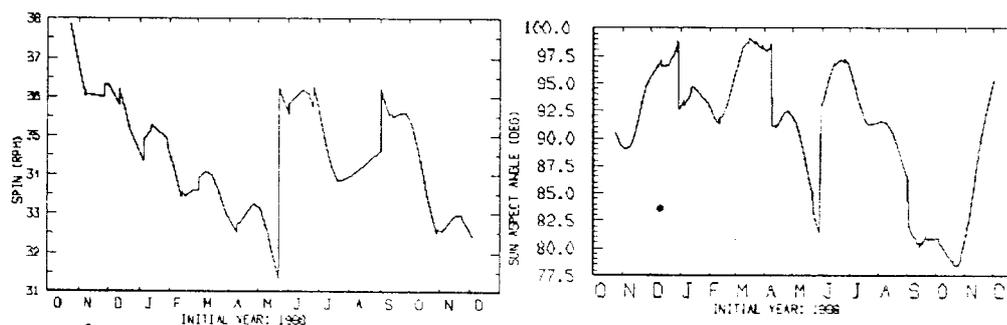
Dois vínculos adicionais foram impostos à órbita do SCD2 no que diz respeito a seu posicionamento relativo em relação ao SCD1. Ambos os satélites completam um total de 14 órbitas a cada 24 horas. Destas 14 órbitas diárias, devido à inclinação do plano orbital em relação ao Equador, da ordem de 25 graus, apenas 8 são visíveis à estação de Cuiabá. Existe pois, a cada 24 horas, um intervalo de tempo correspondente a 6 órbitas (aproximadamente 10 horas) em que não há passagens sobre Cuiabá. Os parâmetros orbitais do SCD2 foram escolhidos de maneira tal que seus ciclos de passagens consecutivas por Cuiabá são complementares, ou seja, durante o período em que não há passagens de um satélite ocorre passagens do outro. Além disto o SCD2 foi espaçado na órbita de modo que a passagem de um satélite só ocorra algum tempo depois da passagem do outro. Verificou-se que ambos os vínculos foram perfeitamente respeitados após o lançamento.

Quanto à atitude do satélite, esta também se apresentou bem próxima à condição esperada após o lançamento, mostrando o seu sucesso também quanto a este aspecto. O vínculo mais restritivo a ser respeitado, neste caso, é o de que os raios solares não

incidissem nos painéis superior e inferior do satélite com um ângulo maior que 10 graus. Isto significa que o ângulo de aspecto solar, que é diretamente medido pelos sensores solares, deve ficar na faixa entre 80 e 100 graus. As leituras dos sensores solares indicaram, após a injeção em órbita do satélite, um valor médio de 90,3 graus, bastante próximo, portanto, do valor ideal.

## 6. DESEMPENHO DO SCD2

Pouco mais de um ano após seu lançamento, todos os subsistemas do SCD2 continuam a apresentar um desempenho amplamente satisfatório. A verificação completa do Subsistema de Controle de Atitude, contudo, só pode ser efetuada após a realização das primeiras manobras de controle. Este satélite, diferentemente do SCD1, possui, além das bobinas de torque para execução de manobras de reorientação do eixo de rotação, um sistema de controle autônomo de velocidade de rotação, que age também por atuação magnética. Este sistema deve manter a velocidade de rotação do satélite dentro da faixa de 32 a 36 rpm. Sempre que a velocidade de rotação atinge o limite inferior da referida faixa, o sistema de controle é automaticamente acionado. Quando a velocidade sob efeito do torque de controle atinge novamente o limite superior da faixa, o sistema é desligado, também de forma automática, encerrando a manobra. Hoje, a mais ano após o lançamento, o bom desempenho do Subsistema de Controle de Atitude pôde ser comprovado (ver Figura 3). Graças à execução de manobras comandadas de solo o ângulo de aspecto solar foi confinado à sua faixa nominal de variação, respeitando rigorosamente os vínculos impostos pela missão. A velocidade de rotação também foi mantida dentro de sua faixa operacional graças à ação do citado sistema de controle.



## 7. OS SATÉLITES CBERS

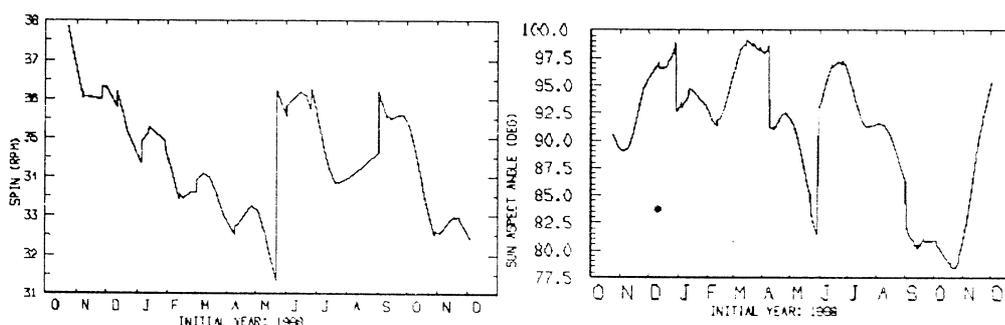
Dentre as missões espaciais em desenvolvimento no INPE destaca-se a missão sino-brasileira CBERS ("China-Brazil Earth Resources Satellites") que prevê o desenvolvimento, em cooperação com a China, de quatro satélites heliosíncronos de observação da Terra, que deverão fornecer cobertura global de imagem, em ciclos de 26 dias. Os satélites CBERS possuem cerca de 1.540 kg de massa, e são equipados com três tipos de instrumentos óticos:

a- Uma câmera CCD de alta resolução, que gera imagens em 5 bandas espectrais, com resolução menor que 20 metros, varrendo uma faixa no solo da ordem de 113 km de largura em cada órbita.

incidissem nos painéis superior e inferior do satélite com um ângulo maior que 10 graus. Isto significa que o ângulo de aspecto solar, que é diretamente medido pelos sensores solares, deve ficar na faixa entre 80 e 100 graus. As leituras dos sensores solares indicaram, após a injeção em órbita do satélite, um valor médio de 90,3 graus, bastante próximo, portanto, do valor ideal.

## 6. DESEMPENHO DO SCD2

Pouco mais de um ano após seu lançamento, todos os subsistemas do SCD2 continuam a apresentar um desempenho amplamente satisfatório. A verificação completa do Subsistema de Controle de Atitude, contudo, só pode ser efetuada após a realização das primeiras manobras de controle. Este satélite, diferentemente do SCD1, possui, além das bobinas de torque para execução de manobras de reorientação do eixo de rotação, um sistema de controle autônomo de velocidade de rotação, que age também por atuação magnética. Este sistema deve manter a velocidade de rotação do satélite dentro da faixa de 32 a 36 rpm. Sempre que a velocidade de rotação atinge o limite inferior da referida faixa, o sistema de controle é automaticamente acionado. Quando a velocidade sob efeito do torque de controle atinge novamente o limite superior da faixa, o sistema é desligado, também de forma automática, encerrando a manobra. Hoje, a mais ano após o lançamento, o bom desempenho do Subsistema de Controle de Atitude pôde ser comprovado (ver Figura 3). Graças à execução de manobras comandadas de solo o ângulo de aspecto solar foi confinado à sua faixa nominal de variação, respeitando rigorosamente os vínculos impostos pela missão. A velocidade de rotação também foi mantida dentro de sua faixa operacional graças à ação do citado sistema de controle.



## 7. OS SATÉLITES CBERS

Dentre as missões espaciais em desenvolvimento no INPE destaca-se a missão sino-brasileira CBERS ("China-Brazil Earth Resources Satellites") que prevê o desenvolvimento, em cooperação com a China, de quatro satélites heliosíncronos de observação da Terra, que deverão fornecer cobertura global de imagem, em ciclos de 26 dias. Os satélites CBERS possuem cerca de 1.540 kg de massa, e são equipados com três tipos de instrumentos óticos:

a- Uma câmera CCD de alta resolução, que gera imagens em 5 bandas espectrais, com resolução menor que 20 metros, varrendo uma faixa no solo da ordem de 113 km de largura em cada órbita.

- b- Um "Scanner" infravermelho multi-espectral, que gera imagens de média resolução (80 a 160 metros) varrendo, em cada órbita, uma faixa no solo da ordem de 120 km de largura.
- c- Um imageador de campo largo, projetado no Brasil, que varre uma área de 885 km em torno de traço orbital e possui uma resolução da ordem de 256 metros.

Além dos três instrumentos óticos citados acima o CBERS1, primeiro satélite da série, possui também, a exemplo dos satélites SCD1 e SCD2, um transponder de coleta de dados para a retransmissão de dados da rede de PCDs do Sistema de Coleta de Dados Ambientais, descrito na seção 5. Este satélite foi lançado com sucesso em 14.10.99, à 1h15 (horário de Brasília), através do lançador chinês Longa Marcha 4B, a partir do Centro de Lançamento de Taiyuan, na República Popular da China. Os valores dos elementos orbitais médios do satélite após sua injeção em órbita (14/10/1999 às 03:28:58,34 GMT) foram os seguintes:

a (semi-eixo maior da órbita)	=	7114355.0 m
e (excentricidade)	=	0,0011040
i (inclinação)	=	98,55425°
$\Omega$ (ascensão reta do nodo ascendente)	=	17,30022°
$\omega$ (argumento do perigeo)	=	45,82733°
M (anomalia média)	=	347,41464°

No dia 3 de novembro foi iniciada a execução de manobras orbitais, com a finalidade de colocar o satélite na órbita heliosíncrona de operação. Esta fase inicial de manobras de correção de órbita foi encerrada com sucesso no dia 8/11/1999 às 03:35:29 GMT. Após a execução das manobras os elementos orbitais médios apresentaram os seguintes valores:

a	=	7131484 m
e	=	0.002154
i	=	98.555°
$\Omega$	=	21.788°
$\omega$	=	103.510°
M	=	118.038°

O CBERS1 não apresentou desde a injeção em órbita qualquer problema significativo de funcionamento. Os resultados testes de aceitação em órbita do satélite efetuados pelo INPE confirmaram o bom desempenho dos subsistemas do satélite.

O controle deste satélite deverá ser compartilhado entre Brasil e China, de maneira proporcional à participação de cada país no projeto. Como o Brasil possui um terço de participação, o INPE deverá assumir o controle do CBERS1 durante 6 meses, após a China tê-lo assumido pelos primeiros 12 meses. No primeiro ano de operação, porém, o Brasil participa de modo passivo das operações de controle, através do rastreamento do satélite

a partir da estação terrena de Cuiabá. Durante cada passagem são executadas medidas da distância estação-satélite, utilizadas para a determinação de órbita do satélite, a partir da qual são computadas as previsões de passagens futuras do satélite sobre a região de visibilidade de Cuiabá. A telemetria do satélite é também monitorada pelo INPE durante estas passagens. Uma antena específica, na estação de Cuiabá, é responsável pela aquisição dos dados relativos às imagens dos instrumentos óticos do satélite. Estes dados são gravados na estação de rastreamento e enviados a Cachoeira Paulista onde são processados.

O segundo satélite da série, o CBERS2 respeitará a mesma proporção, em termos de compartilhamento de operações entre China e Brasil. Neste caso, porém, o Brasil assumirá o controle após os primeiros 8 meses desde a injeção em órbita.

## 8. PRÓXIMOS SATÉLITES DO INPE

Dentro do programa MECB (Missão Espacial Completa brasileira) estava inicialmente previsto o desenvolvimento de dois satélites de coleta de dados (SCD1 e SCD2) e dois satélites de sensoriamento remoto (SSR1 e SSR2). A estes satélites foram adicionados outros dois satélites de coleta de dados: o satélite SCD2-A, cujo lançamento em novembro de 1997, através de lançador nacional infelizmente falhou, e o SCD3 que, além da missão de coleta de dados, deverá servir de teste ao sistema de controle de atitude em três eixos, desenvolvido para utilização em satélites futuros. A missão dos satélites de sensoriamento remoto da MECB foi modificada em relação à proposta inicial. A órbita destes satélites que inicialmente deveria ser heliosíncrona, deverá ser equatorial, restringindo a cobertura do satélite à região compreendida entre os paralelos 5°N e 15°S, mas aumentando a frequência de revisita de aproximadamente 1 vez por mês para 14 vezes por dia.

A tabela 2 apresenta as futuras missões que estão atualmente em fase desenvolvimental ou de planejamento no INPE. Dentre estas missões destaca-se a missão sino-brasileira CBERS ("China- Brazil Earth Resources Satellites") que, conforme mencionado na seção 8, prevê o desenvolvimento, em cooperação com a China, de quatro satélites heliosíncronos de sensoriamento remoto, sendo que o primeiro já se encontra em operação. O segundo satélite da série, o CBERS-2, encontra-se em fase de integração no Laboratório de Integração e Teste (LIT) do INPE, possuindo lançamento previsto para final 2001. Os demais futuros satélites do INPE, listados na tabela 2 são os seguintes:

- FBM (French-Brazilian Microsatellite)

O FBM de um micro-satélite científico que está sendo desenvolvido em conjunto pelo Brasil (INPE) e França (CNES: Centre National d'Etudes Spatiales). Deverá ser injetado em uma órbita circular de 750km de altitude, e inclinação de 6 graus. Terá um de seus eixos apontado para o Sol, com uma precisão da ordem de 0,5 graus. O FBM deverá transportar o seguintes experimentos brasileiros e franceses:

1. APEX: prótons, elétrons e partículas alfa, na magnetosfera
2. PDP: medidas da densidade de plasma na Ionosfera

- 3. CPL: qualificação de sistema para controle térmico passivo
- 4. CBEMG: efeito da microgravidade
- 5. FLUXRAD: avaliação e qualificação de sensor para medição do fluxo líquido de radiação do Sol e albedo.

- SABE (Satélite Argentino, Brasileiro e Espanhol)

O SABE é um satélite que será dedicado à monitoração de água, produção de alimentos, e ambiente que está sendo desenvolvido em regime de cooperação entre o Brasil, Argentina e Espanha. Para isto deverá fornecer, em tempo real, imagens de altas resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica. Deverá ser lançado em uma órbita circular sol-síncrona, com 803 km de altitude, 98,6 graus de inclinação, com um ciclo de revisita de 4 dias. O horário local de passagem pelo nodo descendente será 11:00 hs. Possuirá estabilização de atitude em três eixos.

- SSR1 e SSR2 (Satélites de Sensoriamento Remoto 1 e 2 )

O SSR1 e SSR2 serão pequenos satélites de observação da região tropical. Serão injetados em órbita de baixa altitude (905km) no plano do Equador ( $i = 0^\circ$ ). Os instrumentos óticos de bordo cobrirão a região equatorial compreendida entre  $5^\circ$  de latitude norte e  $15^\circ$  de latitude sul, o que corresponde a uma faixa de varredura de 2200km. Esta órbita fornece um intervalo de revisita menor que duas horas, com mais de cinco aquisições aproveitáveis de imagem durante o dia.

- SCD3 (Terceiro Satélite de Coleta de Dados)

O terceiro satélite de coletas de dados deverá, além da missão de coleta de dados, servir de teste ao sistema desenvolvido para o controle de atitude em três eixos. Deverá ser injetado em uma órbita circular equatorial, com 900 km de altitude e possuirá estabilização de atitude em três eixos.

	CBERS-2	FBM	SABE	SSR1/SSR2	SCD3
Inclinação	98.5°	6°	98.6°	0°	0°
Altitude (km)	778	750	1100	905	900
Estabilização de Atitude	3 Eixos	3 Eixos	3 Eixos	3 Eixos	3 Eixos
Massa (kg)	1.540	89	510	~ 190	~ 300
Lançamento	2001	2003	2005	2005/2009	2007

Tabela .2: Próximos Satélites do INPE

REFERÊNCIAS

- Kuga, H. K.; Kondapalli, R. R.** "Satellite Orbit Determination: A First-Hand Experience With the First Brazilian Satellite SCD1". 44th. Congress of the IAF, Graz, Austria, October 1993.
- Kuga, H. K.; Orlando, V.; Lopes, R. V. F.** "Flight Dynamics Operations During Leap for the INPE's Second Environmental Data Collecting Satellite SCD2". Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Vol. XXI. Special Issue, ISSN 0100-7386, 1999, pp. 339-344.
- Lopes, R. V. F.; Orlando, V.; Kuga, H. K., Guedes, U. T. V.; Kondapalli, R. R.** "Attitude Determination of the Brazilian Satellite SCD1", Revista Brasileira de Ciências Mecânica, vol. XVI, Edição especial, pp. 421-425, fevereiro de 1994.
- Orlando, V.** "Lançamento e Operação do Primeiro Satélite do INPE, SCD1; Perspectivas de Novos Satélites", Sétimo Colóquio de Dinâmica Orbital, Santos, Brasil, Novembro de 1994.
- Orlando, V.; Lopes, R. V. F.; Kuga, H. K.** "INPE's Flight Dynamics Team Experience Throughout Four Years of SCD1 In-Orbit Operations: Main Issues, Improvements and Trends", "ESA International Symposium on Spaceflight Dynamics", European Space Agency, Darmstadt, Alemanha, junho, 1997.
- Orlando, V.** "Atividades de Controle de Satélites no INPE", UNESP, 2a Escola de Verão em Dinâmica Orbital e Planetologia, Guaratinguetá, SP, janeiro, 1998, pp.21-31.
- Orlando, V.; Kuga, H. K.; Guedes, U. T. V.** "Flight Dynamics LEOP and Routine Operations for SCD2, the INPE's Second Environmental Data Collecting Satellite", NASA/AAS(American Astronautical Society), 13th International Symposium on Spaceflight Dynamics", NASA/Goddard Space flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, maio, 1998, preprint: pp. 997-1007 (em fase de publicação no periódico: "AAS Advances in the Astronautical Science", AAS Publications Office, USA, 1998)
- Rozenfeld, P.; Orlando, V.; Scheneider, E. T.** "Overview of the INPE's Satellite Tracking and Control Center and Main Aspects of its Debut in Satellite Operations", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas. vol. XVI, Edição especial, pp. 421-425, fevereiro de 1994.
- Rozenfeld, P.; Orlando, V.; Miguez, R. R. B.** "SCD1 Three Years In-Orbit Operations", "SPACEOPS-96: Fourth International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems, ESA, Darmstadt, Alemanha, setembro de 1996.
- Rozenfeld, P.; Orlando, V.; Galski, R. L.** "Leap Operations For SCD2, The Inpe's Second Environmental Data Collecting Satellite", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Vol. XXI, Special Issue, ISSN 0100-7386, 1999, pp. 243-247.
- Shigehara, M.** "Geomagnetic Attitude Control of na Axisymmetric Spinning Satellite, J. Spacecraft, vol. 9, n. 6, junho de 1972.

Yamaguti, W.; Ribeiro, E. A.; Becceneri, J. C.; Itami, S. N. "Collection and Treatment of the Environmental Data with the Brazilian Satellite SCD1", International Symposium on Spacecraft Ground Control and Flight Dynamics", February 1994, São José dos Campos, SP, Brazil.