

CAPÍTULO 6

Rastreo e controle de satélites do INPE

VALCIR ORLANDO E HÉLIO KOITI KUGA

Neste capítulo serão focalizadas as atividades de rastreo e controle de satélites do INPE. Serão apresentadas ainda a organização formal adotada e a infra-estrutura de solo desenvolvida para a realização dessas atividades, tanto em termos de hardware e software, quanto de recursos humanos.

1. Introdução

Na estrutura organizacional formal do INPE, o órgão interno responsável pelas atividades de operação de satélites artificiais é o denominado Centro de Rastreo e Controle de Satélites – CRC. Inicialmente, com o objetivo de introduzir preliminarmente o CRC é apresentada uma breve descrição de como este centro se encontra internamente estruturado para a realização de sua missão. Logo após, é dado um detalhamento das atividades, metodicamente elaboradas, envolvidas na preparação do CRC para controlar cada novo satélite do INPE, tendo em vista os altos graus de segurança e confiabilidade requeridos por essa tarefa. O objetivo é minimizar a probabilidade de colocar em risco, por falha operacional, a integridade do satélite. A responsabilidade é grande, já que a ocorrência de um simples

erro operacional pode ter conseqüências imprevisíveis, podendo mesmo determinar o fim da vida útil do satélite. Trata-se de um tipo de veículo cuja localização o torna inacessível para a realização de trabalhos de manutenção ou de reparos e que, além disso, é continuamente submetido a rigorosas variações de temperatura, em ambiente de baixa gravidade e pressão atmosférica praticamente nula (vácuo). Exemplificando, a temperatura externa pode variar numa faixa da ordem de -40 a $+100$ graus centígrados durante cada período orbital. No caso dos atuais satélites do INPE, esse período é da ordem de 100 minutos.

Também são abordados no presente capítulo os tópicos mais relevantes ligados ao controle dos satélites CBERS-1 e CBERS-2 que são, respectivamente, o primeiro e o segundo satélites de observação da Terra desenvolvidos em cooperação com a China. Importante adiantar que, atualmente, apenas o CBERS-2 ainda se encontra em estado operacional.

A título apenas de recordação, os satélites de coleta de dados ambientais, SCD1 e SCD2, concebidos, projetados, fabricados e controlados pelo INPE, no âmbito da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), assim como o SCD2-A (destruído antes do lançamento), já foram tratados em capítulo anterior. Por esse motivo não serão objetos desta abordagem.

Mas, vale adicionar a esses satélites acima, de incontestável sucesso, outros dois desenvolvidos no INPE, cujas missões, infelizmente, foram precocemente interrompidas: o SACI-1 e o SACI-2. Nenhum deles, por diferentes motivos, chegou a operar em órbita. O SACI-1, lançado em conjunto com o satélite sino-brasileiro CBERS-2 pelo lançador chinês Longa Marcha 4B, foi injetado em uma órbita praticamente nominal. Entretanto, após a injeção, ele não transmitiu qualquer sinal ao solo devido à ocorrência de problemas de funcionamento de equipamentos de bordo. O SACI-2, por outro lado, foi lançado a partir da Base de Lançamento Alcântara por um veículo lançador brasileiro VLS, e não chegou a ser injetado em órbita devido à ocorrência de uma falha de funcionamento do lançador que provocou a sua destruição, comandada de solo, em pleno vôo ascendente.

2. Os Satélites CBERS

O Programa CBERS para o desenvolvimento de satélites hélio-síncronos de observação da Terra foi assinado, no contexto de um acordo de cooperação tecnológica entre o Brasil e a China, em 6 de julho de 1988. Esse programa envolvia fundamentalmente duas instituições: o INPE, pelo lado brasileiro, e a CAST (Aca-

demia Chinesa de Tecnologia Espacial), pelo lado chinês. A sigla CBERS é formada pelas iniciais da expressão em inglês “China-Brazil Earth Resources Satellite”, que significa Satélite Sino Brasileiro de Recursos Terrestres. O investimento total, da ordem de 300 milhões de dólares, seria repartido entre os dois países, na proporção da ordem de 30% para o Brasil e 70% para a China. Inicialmente, o Programa CBERS previa o desenvolvimento e construção de dois satélites similares de observação da Terra: o CBERS-1 e o CBERS-2, o que efetivamente aconteceu. A carga útil principal de cada satélite foi composta por uma câmera CCD, operando na faixa de luz visível, com resolução da ordem de 20 metros; uma câmera de varredura multi-espectral infravermelha, denominada IRMSS; com resolução da ordem de 180 metros; e um imageador de campo amplo desenvolvido pelo INPE, com resolução da ordem de 256 metros, denominado WFI.

Além das câmeras foi acrescentado aos satélites, como carga útil secundária, um transponder de coleta de dados ambientais, para que eles pudessem contribuir com a missão dos satélites SCD1 e SCD2. A figura 1 mostra uma foto do CBERS-1 com os painéis solares abertos, durante a realização de testes no Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE.

As órbitas dos satélites CBERS são do tipo polar hélio-síncrona, cuja característica principal consiste no fato de que esse tipo de órbita passa por uma mesma latitude geográfica sempre no mesmo horário local. Isso significa que os satélites sempre enxergarão um mesmo local sob as mesmas condições de iluminação solar. Essa é a característica que torna esse tipo de órbita adequado ao emprego em missões de observação da Terra por imageamento. Considerando, por

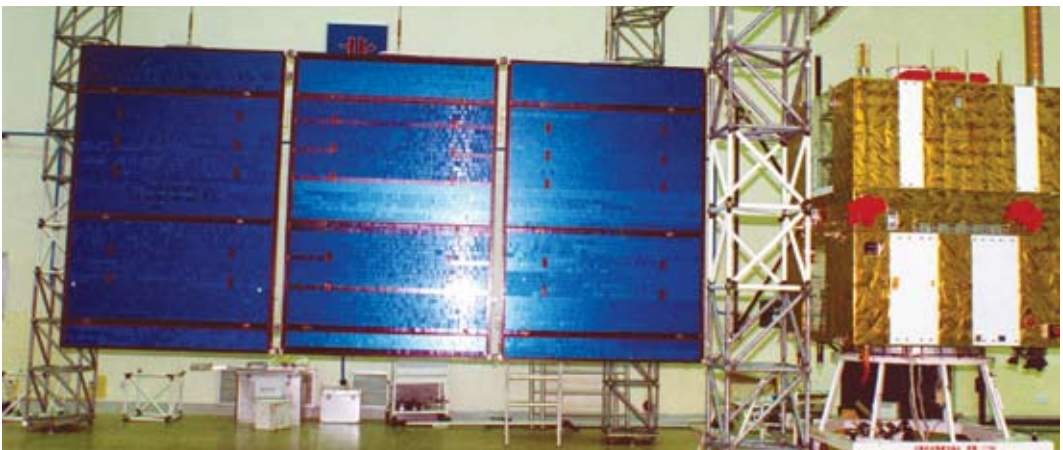


Figura 1 - Satélite CBERS-1 no LIT

exemplo, as imagens óticas da câmera CCD dos satélites CBERS, elas cobrem em cada órbita do satélite uma faixa de 113 quilômetros de varredura, em torno do traço orbital, que é a projeção ortogonal da órbita na superfície terrestre. As imagens de regiões maiores são compostas pelo interposicionamento, lado a lado, de imagens geradas em órbitas com traços suborbitais adjacentes. O período decorrido entre uma dada órbita e a ocorrência da próxima adjacente a ela é da ordem de um dia, tempo necessário para compor uma imagem composta. Em conseqüência, esta última é formada por faixas de imagens adjacentes tomadas, portanto, em dias diferentes. Considere uma região qualquer localizada na fronteira entre duas faixas adjacentes. A imagem de uma tal região será, portanto, composta de duas faixas de imagem posicionadas lado a lado, tomadas em dias diferentes. Se cada uma delas fosse tomada em um horário diferente do dia então a imagem composta pelas duas faixas não seria homogênea em termos de iluminação. Deve ser destacado ainda que o ângulo com que a luz solar atinge um determinado ponto da Terra depende do horário local, e que ângulos de iluminação diferentes implicam em tamanhos diferentes das sombras projetadas por objetos de mesma altura. O hélio-sincronismo da órbita, cuja característica principal é, como visto, a de fazer com que o satélite passe sobre uma mesma latitude sempre no mesmo horário local, garante que as imagens de uma mesma região sejam sempre tomadas sob as mesmas condições de iluminação solar. Essa é a razão pela qual esse tipo de órbita é largamente utilizado em missões de sensoriamento remoto. O CBERS-1 e o CBERS-2 têm um ciclo orbital de vinte e seis dias. A cada vinte e seis dias o satélite cobre (imageia) toda a superfície terrestre, completando um ciclo de imageamento e iniciando outro.

Em novembro de 2002, motivados pelo sucesso dos dois primeiros satélites da série CBERS, os governos do Brasil e da China decidiram pela continuidade do programa, assinando um novo acordo de cooperação, para o desenvolvimento de três novos satélites: o CBERS-2B, o CBERS-3 e o CBERS-4. Neste novo acordo, a participação brasileira foi ampliada de 30% para 50%.

Além dos instrumentos óticos de sensoriamento remoto, a exemplo do CBERS-1 e CBERS-2, todos os satélites da série CBERS serão, também, equipados com um transponder de coleta de dados.

A aquisição dos dados relativos às imagens geradas pelos instrumentos óticos do CBERS-2, que é o satélite da série atualmente em operação, é feita pela Estação Terrena de Recepção de Imagens de Cuiabá. Estes dados são gravados na estação e enviados para São José dos Campos, onde são processados. Já os dados

do Sistema de Coleta de Dados Ambientais são recebidos pelas Estações de TT&C de Cuiabá e Alcântara e enviados para o Centro de Missão de Coleta de Dados – CMCD, localizado na cidade de Cachoeira Paulista.

Durante o desenvolvimento do CBERS-1, foi acordado entre a gerência local do programada MECB e o CLTC (China Launching and Control General), instituição responsável pelas atividades de operação de satélites na China, que o controle de solo dos satélites seria compartilhado pelo XSCC (Xian Satellite Control Center) e pelo CRC de maneira proporcional à participação de cada país no projeto, ou seja, o CRC ficaria responsável pelas atividades de controle durante 30% do tempo de vida nominal de cada satélite, e o XSCC durante os 70% restantes.

2.1. O CBERS-1

O CBERS-1 foi lançado em 14 de Outubro de 1999 à 1h15 (horário de Brasília) pelo lançador chinês Longa Marcha 4B, a partir do Centro de Lançamento de Taiyuan, na República Popular da China. A figura 2 apresenta uma foto do instante do lançamento. Em 3 de novembro de 1999 foi iniciada uma fase de execução de manobras, com a finalidade de colocar o satélite em sua órbita hélio-síncrona de



Figura 2 - O lançamento do CBERS-1

operação (altitude de 778 metros, com inclinação de 98,5 graus), a qual durou até 8 de novembro de 1999 às 03:35:29 GMT.

Conforme mencionado anteriormente, foi acordado entre O INPE e o CLTC que o controle dos satélites CBERS seria compartilhado entre Brasil e China, de maneira proporcional à participação de cada país no projeto. Desse modo, no primeiro ano de operação do CBERS-1, o controle da sua plataforma de serviço ficou sob a responsabilidade do centro de controle chinês. Nesse período, o CRC participou apenas de modo passivo do controle do satélite, executando somente operações de rastreo e monitoramento de telemetria de serviço. A ativação da carga útil do satélite para atender aos usuários brasileiros seria sempre responsabilidade do CRC.

De março a setembro de 2001, o CRC assumiu o controle total do CBERS-1, incluindo a responsabilidade pelo cálculo e aplicação de manobras de órbita. Durante esse período, duas manobras orbitais foram aplicadas ao satélite pelo CRC: a primeira em 11 de abril e a segunda em 5 de julho de 2001. O objetivo das manobras era corrigir a evolução no tempo do desvio de fase em longitude da órbita do satélite, de modo a manter sua variação dentro dos limites impostos pelos requisitos da missão (± 10.000 metros). Esse parâmetro mede a diferença entre a longitude real do ponto de cruzamento do satélite com o Equador (a longitude na qual o satélite efetivamente cruzou o Equador em uma dada órbita) e aquela na qual ele deveria ter cruzado, caso estivesse exatamente na órbita nominal de referência correspondente (isto é, a órbita nominal de referência em que ele deveria estar, dentro do conjunto de órbitas que compõem a grade de todas órbitas nominais de referência que totalizam um ciclo de cobertura completa do globo terrestre). Existe toda uma grade de órbitas nominais de referência calculadas para o projeto, grade esta composta de 373 órbitas completas correspondentes a um ciclo orbital de 26 dias do satélite. Uma vez concluído um ciclo, outro novo se inicia com o satélite retornando à primeira órbita nominal da grade, reiniciando outra vez a cobertura do globo terrestre. Se o movimento orbital do satélite evoluísse de modo exatamente coincidente com a grade nominal de referência, então o desvio de fase seria sempre nulo, já que não haveria diferença entre a órbita nominal e a real. Desse modo, idealmente, o satélite seria injetado exatamente na primeira órbita da grade nominal e nela se manteria, órbita após órbita, ciclo após ciclo, até o término da missão. Infelizmente, no mundo real, isso não é factível. Devido principalmente ao arrasto atmosférico, a altitude da órbita decai com o decorrer do tempo, reduzindo, em consequência,

o valor do semi-eixo maior da elipse orbital e fazendo com que a órbita real se afaste lentamente da órbita nominal. A velocidade de variação do desvio de fase (isto é, a derivada primeira em relação ao tempo desse parâmetro) é inversamente proporcional ao valor do semi-eixo maior da órbita, aumentando, portanto, à medida que o valor desse parâmetro é reduzido sob o efeito do arrasto. O decaimento contínuo do semi-eixo orbital provoca, por sua vez, uma variação contínua da derivada primeira em relação ao tempo do desvio de fase. Como resultado dessa variação contínua, praticamente linear, da derivada primeira do desvio de fase, o valor desse parâmetro apresenta uma curva de evolução no tempo aproximadamente parabólica.

Na data de aplicação da primeira manobra de órbita executada pelo CRC com o CBERS-1, o valor do desvio de fase era da ordem de 10,6 km. A manobra foi calculada para causar um incremento do valor do semi-eixo maior da órbita que produzisse uma tal alteração no valor da derivada primeira em relação ao tempo do desvio de fase que, um mês após a sua execução, o valor desse parâmetro atingisse o valor mínimo da ordem de -8 km (lembrando que, conforme explanado acima, a variação média desse parâmetro orbital com o tempo é aproximadamente parabólica, e fortemente influenciada pelas condições vigentes em termos de atividade solar). Devido a uma imprevisível e significativa redução da atividade solar ocorrida no período logo posterior à aplicação da manobra, o parâmetro atingiu um valor mínimo da ordem de -9,8 km, ou seja, 1,8 km abaixo do mínimo de -8 km projetado. Apesar disso, o resultado foi satisfatório, já que o limite inferior da faixa de variação especificada para o CBERS-1 (-10 km) não foi atingido.

A segunda manobra foi aplicada em um período de alta atividade solar e também teve um desempenho satisfatório, apesar de neste caso, ter ocorrido, igualmente, uma queda brusca na atividade solar. Desta vez, porém, em consequência da queda, ao contrário da manobra anterior, o valor mínimo do desvio de fase em longitude ultrapassou um pouco o limite inferior da faixa de variação.

A figura 3 apresenta a curva da evolução no tempo do desvio de fase em longitude para um período que engloba as duas primeiras manobras efetuadas pelo CRC. As linhas vermelhas indicam os limites da faixa de variação

Em 20 de setembro de 2001, o controle do CBERS-1 foi repassado ao XSCC. Em 03 de março de 2002 retornou ao CRC, permanecendo até 03 de junho de 2002. Durante esse período foram executadas, com sucesso, mais três manobras orbitais.

A partir de maio de 2003 ocorreu um problema: o subsistema de controle de atitude e órbita do CBERS-1 passou a apresentar um comportamento instá-

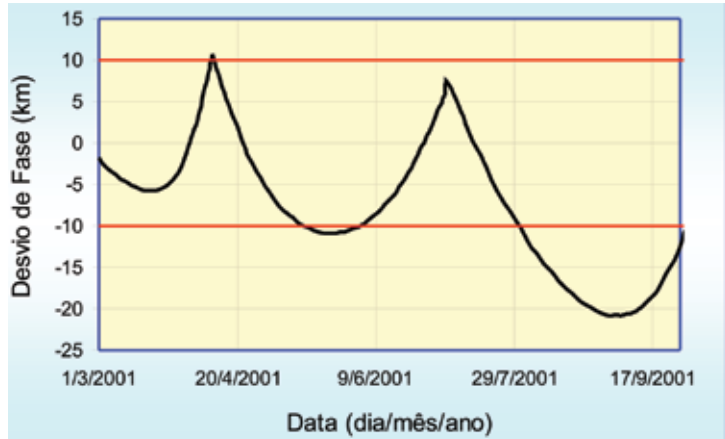


Figura 3 - Desvio de fase em longitude no Equador do CBERS-1

vel. Com isso, o computador de bordo, que controla o subsistema, passou a ser reinicializado em um ciclo aproximado, provocando derivas orbitais cada vez mais acentuadas.

Em agosto de 2003, a ocorrência de uma grave falha de funcionamento decretou o fim da vida útil do satélite, uma vez que ele cessou repentinamente o envio de telemetrias e deixou de responder à ação dos telecomandos originados do solo. De qualquer modo, esse fato somente ocorreu quase quatro anos após o lançamento, enquanto que o prazo nominal estimado inicialmente para a duração da missão era de apenas dois anos. Felizmente, o lançamento bem sucedido do CBERS-2 em 21 de outubro de 2003 garantiu a continuidade da missão do anterior.

2.2. O CBERS-2

O CBERS-2 foi lançado em 21 de outubro de 2003, também por meio do lançador chinês Longa Marcha 4B, a partir do centro de lançamento de Tayuan, na China. A figura 4 apresenta uma ilustração da sequência de lançamento.

O controle ficou sob a responsabilidade do XSCC desde o lançamento até 23 de julho de 2004, quando foi assumido pelo CRC. Em 23 de março de 2005 passou ao XSCC permanecendo sob sua responsabilidade até 23 de novembro de 2005, data em que foi novamente transferido ao CRC. Em 24 de abril de 2006 voltou a ser repassado ao XSCC, conforme previsto no acordo de cooperação. Retornou ao CRC em 23 de outubro desse mesmo ano. Desde então o controle do satélite fica sob a responsabilidade de cada um dos centros de controle por períodos iguais de três meses. A figura 5 apresenta uma concepção artística do CBERS-2 em sua órbita.



Figura 4 - Seqüência de lançamento do CBERS-2



Figura 5 - Concepção artística do CBERS-2 em órbita

A faixa de variação permissível para o desvio de fase em longitude, que para o CBERS-1 era de ± 10 km, foi reduzida, no caso do CBERS-2, para ± 4 km de modo a atender às solicitações dos especialistas em processamento de imagens.

A curva da evolução do desvio de fase durante o primeiro período em que a responsabilidade pelo controle ficou com o CRC (23 de julho de 2004 a 23 de março de 2005) é apresentada na figura 6. A primeira manobra foi realizada em 11 de

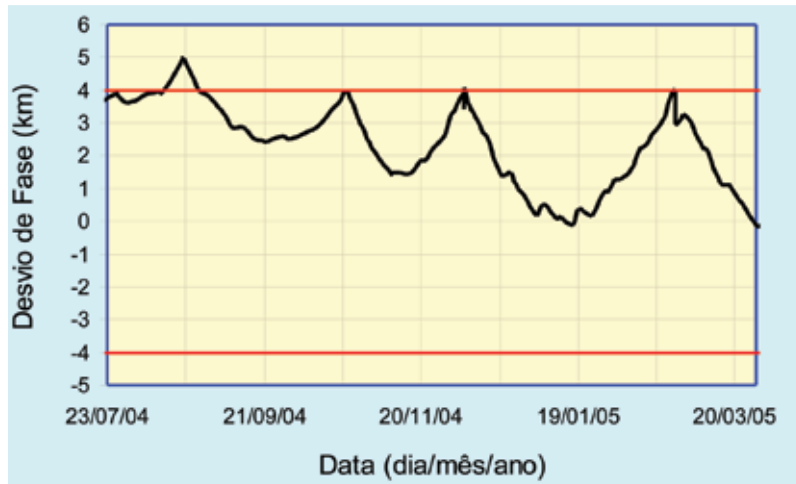


Figura 6 - Desvio de fase em longitude no Equador do CBERS-2

agosto de 2004. Optou-se pela aplicação de uma manobra bastante conservadora para evitar que o desvio de fase pudesse vir a ultrapassar o limite inferior reduzido de -4km , por conta de alguma possível redução brusca do nível de atividade solar, a qual pudesse ocorrer após a execução e que causaria um efeito diferente do planejado. Ainda no primeiro período de responsabilidade do CRC pelo controle do CBERS-2 foram aplicadas três outras manobras, conforme pode ser observado na figura 6. Pode ser observado que, conforme aumentasse a prática na execução de manobras, o mesmo ocorria com o grau de confiança nos resultados, adotando-se, então, manobras menos conservadoras.

Além das manobras representadas na figura 6, que correspondem ao primeiro período de controle do CBERS-2 pelo CRC, várias outras manobras orbitais foram aplicadas. Todas apresentaram resultados satisfatórios.

Em 13/04/2005, uma das duas baterias redundantes do CBERS-2 deixou de funcionar. Desde então, o satélite passou a operar com a outra bateria, perdendo, portanto, a redundância. A bateria é utilizada para fornecer a energia elétrica ao satélite durante as frações de órbita em que em que este permanece na sombra da Terra, quando não há geração de energia por seus painéis solares. Como estratégia, para contornar o problema, algumas das cargas úteis foram colocadas em modo de economia de energia (“stand-by”), a câmera CCD passou a ser ligada apenas 10 minutos, no máximo, por passagem, e o Subsistema de Coleta de Dados (DCS) foi desligado. Embora nominalmente seja considerado que o CBERS-2 ainda integra o Sistema de Coleta de Dados Ambientais, já que o seu subsistema de coleta de dados (DCS) pode ser eventualmente ligado, atualmente ele não está realizando essa função.

2.3. Continuidade da missão CBERS

Motivados pelo sucesso dos dois primeiros satélites da série CBERS, os dois países decidiram pela continuidade do programa, por meio da assinatura de um novo acordo de cooperação e o desenvolvimento três novos satélites: o CBERS-2B, o CBERS-3 e o CBERS-4. Neste novo acordo, a participação brasileira foi ampliada, como já dito anteriormente, de 30% para 50%.

O CBERS-2B é um satélite intermediário que visa assegurar a continuidade da missão, sem interrupção, até que o CBERS-3 seja lançado. Ele é uma réplica do CBERS-2 e, por isso, foi construído em um prazo relativamente curto, com lançamento em setembro de 2007. Foi, entretanto, equipado com uma câmera CCD de alta resolução (□ 2,5m) experimental.

Quanto aos satélites CBERS-3 e CBERS-4, estes deverão ser uma evolução tecnológica dos satélites anteriores da série, com carga útil principal constituída por câmera com desempenhos aprimorados. A órbita dos dois satélites será do mesmo tipo que a dos anteriores. Os lançamentos estão previstos para os anos de 2009 e 2012, respectivamente. Na figura 7 é apresentada uma concepção artística do CBERS-3

Para os próximos anos, além dos satélites CBERS, estão previstos os lançamentos dos micro-satélites EQUARS (Equatorial Atmosphere Research Satellite), em 2008, e MIRAX (Monitor e Imageador de Raios-X), em 2009, que fazem parte do programa de micro-satélites científicos do INPE; e dos satélites de sensoriamento remoto SSR-1, em 2010, e SSR-2, em 2012. Estes últimos utilizarão uma plataforma multi-missão que está sendo desenvolvida no INPE.

Além dos satélites já mencionados, encontra-se em fase de estudo preliminar (realizado em colaboração entre INPE e DLR - Agência Espacial Alemã) um saté-

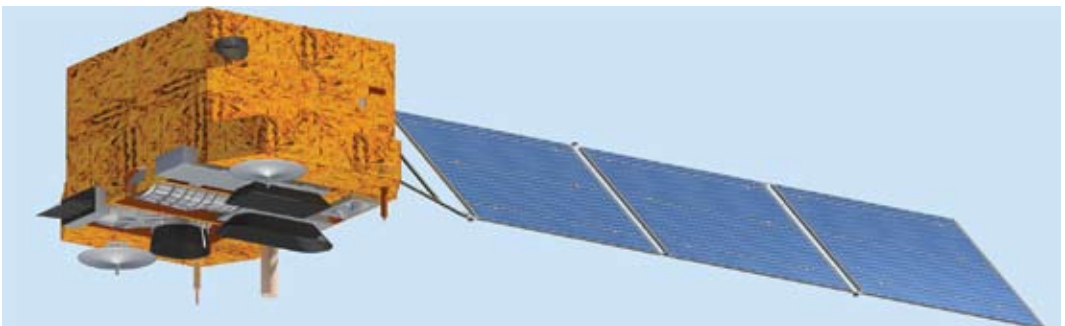


Figura 7 - Concepção artística do CBERS-3

lite denominado MAPSAR (Multi-Application Purpose SAR), cuja carga útil será um radar imageador de abertura sintética ou SAR (Synthetic Aperture Radar). O lançamento está previsto somente após 2012.

Em complemento, o INPE está participando do rastreo e recepção de dados de carga útil do mini-satélite COROT (Convecção, Rotação e Trânsitos Planetários), do CNES - Centre National D'Études Spatiales (Agência Espacial Francesa). A missão desse satélite consiste de detectar, através de medidas da variação de intensidade da luz de estrelas, a existência de planetas fora do sistema solar (exoplanetas). Estima-se que o COROT poderá descobrir, em seus dois anos e meio previsto de vida útil, cerca de mil planetas gigantes semelhantes a Júpiter e cerca de cem planetas menores semelhantes à Terra. Uma estação de rastreo e recepção de dados de carga útil (chamada de Estação de Satélites Científicos do INPE) foi instalada em Alcântara para servir ao satélite COROT. Ela também será usada para o rastreo dos futuros micro-satélites EQUARS e MIRAX, do INPE.

O satélite COROT foi lançado em 27 de dezembro de 2006 por um lançador Soyouz 2-1B, a partir da base de Baikonur, no Cazaquistão. Entrou em fase operacional após passar por uma fase inicial de aceitação em órbita, a qual durou alguns dias. A partir de então, a nova estação de satélites científicos de Alcântara iniciou sua participação na missão, passando a rastrear o satélite e a receber seus dados de carga útil em modo de rotina.

3. Os satélites científicos SACI-1 e SACI-2

Em paralelo ao desenvolvimento do CBERS-1 transcorreu, no INPE, o projeto dos micro-satélites científicos SACI. O primeiro deles, o SACI-1 foi colocado em órbita juntamente com o CBERS-1 pelo lançador chinês Longa Marcha 4B. Foi ejetado 25 segundos após a liberação do CBERS-1, praticamente na mesma órbita que este, a 761 quilômetros de altitude. Os satélites científicos desta série (dois estavam previstos) deveriam ser operados a partir de uma estação de rastreo, controle e recepção de dados das cargas úteis especialmente adquirida pelo INPE para essa finalidade. Instalada em Natal (RN), a estação não era subordinada ao CRC, e nem era tecnologicamente compatível com as estações de Cuiabá e Alcântara. Nominalmente, por decisão do gerenciamento do projeto, o CRC não seria envolvido nas atividades operacionais destes satélites. O SACI-1, lançado de uma base na China e injetado quase na mesma órbita que o CBERS-1, só passaria sobre a região de visibilidade da estação de Natal oito horas, aproximadamente, após sua injeção em órbita. O seu transmissor de bordo,

que foi lançado desligado, deveria ser ativado pelo computador de bordo logo após a separação satélite-último estágio do lançador. Quando, finalmente, o satélite passou pela primeira vez sobre Natal, a antena foi apontada segundo a direção prevista para o aparecimento do mesmo no horizonte, mas infelizmente o sinal do satélite não foi recebido em solo. Nem na primeira passagem do satélite sobre Natal, nem em nenhuma outra subsequente. Duas causas foram consideradas como mais prováveis para o problema. A primeira é que o transmissor não tenha sido ativado devido à ocorrência de alguma falha com o computador de bordo que, por algum motivo, não comandou a ativação. A outra supõe a ocorrência de algum problema com a própria chave de energização do transmissor que, por algum motivo, não atuou. Apesar disso, o satélite foi rastreado passivamente pelos radares do NORAD (North American Aerospace Defense Command), uma organização binacional americana e canadense que rastreia, executa determinações periódicas de órbita e cataloga praticamente todos os objetos lançados em órbita da Terra. O NORAD manteve estimativas orbitais atualizadas do SACI-1 em sua página da Internet, as quais confirmavam que o satélite havia sido inserido em uma órbita bastante próxima à nominal. Os resultados das sucessivas determinações de órbita disponibilizados pelo NORAD foram, a seguir, utilizados para gerar novas previsões de passagens do satélite sobre a estação de Natal, com o objetivo de continuar as tentativas de ativação, por telecomandos, do seu transmissor de bordo. Após várias tentativas fracassadas, o CRC foi solicitado a prestar apoio através de suas estações de Cuiabá e de Alcântara. Isso requereu a execução de alguns trabalhos de adaptação dos equipamentos dessas estações para compatibilizá-los com o sistema de TM/TC do satélite, já que ele havia sido desenvolvido para atuar somente com a nova estação de Natal, projetada especificamente para o projeto SACI que, por sua vez, não era compatível com as estações do CRC (como citado anteriormente). As tentativas do CRC, infelizmente, também não obtiveram sucesso na aquisição do sinal do satélite. O CRC chegou a transmitir com uma potência de 700W (quando a nominal é de apenas 45W) com auxílio de seu “Amplificador de Alta Potência” – HPA, cujo componente principal era uma dispendiosa válvula Klystron. A título de informação, o HPA foi substituído algum tempo depois por um amplificador tecnologicamente mais avançado, de estado sólido, conhecido simplesmente por PA, que atualmente é o tipo de equipamento utilizado pela maior parte das estações de rastreamento modernas.

Após três meses de infrutíferas tentativas, o satélite SACI1 foi oficialmente considerado como perdido.

Aos satélites acima deve ser acrescentado um outro satélite de coleta de dados ambientais SCD2-A, cujo lançamento seria em novembro de 1997 através do

um lançador nacional VLS e que não chegou a ocorrer. Este satélite foi destruído antes do lançamento, devido ao grave acidente ocorrido com o VLS ainda em fase de preparação na torre de lançamento, no Centro de Lançamento de Alcântara, conforme já mencionado em capítulo anterior.

4. O Centro de Rastreo e Controle de Satélites do INPE

Na estrutura organizacional formal do INPE, a execução de todas as atividades relacionadas com a operação de satélites artificiais é responsabilidade do “Centro de Rastreo e Controle de Satélites” (CRC), que dispõe de um conjunto de sistemas de solo e de recursos humanos altamente qualificados para o cumprimento de sua missão final, que é garantir a utilização segura dos satélites propriamente ditos. Foi criado em 1988 tendo em vista a preparação para o lançamento do SCD1, primeiro satélite da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB). Sua concepção iniciou-se com o advento da MECB, e envolveu a consultoria de especialistas de importantes instituições espaciais estrangeiras, com destaque à Agência Espacial Européia (ESA – European Space Agency), cuja contribuição foi extremamente importante não apenas em termos do projeto e desenvolvimento de sistemas físicos, mas também da formação de recursos humanos qualificados. A participação de consultores estrangeiros era extremamente necessária, pois, até aquela época, não houve praticamente nenhuma experiência anterior no Brasil que pudesse ter gerado alguma competência técnica significativa no país na área espacial.

Atualmente, o CRC é composto por duas estações de rastreo, onde estão localizadas as antenas e demais equipamentos responsáveis pela comunicação com os satélites controlados e um Centro de Controle de Satélites (CCS) que além de ser a sede administrativa, é responsável pelo planejamento e execução de todas as atividades ligadas ao controle de veículos espaciais. O CCS localiza-se na cidade de São José dos Campos, SP. Quanto às estações de rastreo, lembrando, uma delas está localizada na cidade de Cuiabá, estado de Mato Grosso, e a outra na cidade de Alcântara, no estado de Maranhão. As unidades do CRC são interligadas por uma rede dedicada de comunicação de dados. A figura 8 apresenta uma ilustração da composição do CRC e suas funções, com o objetivo de auxiliar o entendimento do texto que se segue, no qual essa importante unidade operacional do INPE é descrita com algum detalhe.



Figura 8 - Composição e operação do CRC

As estações terrenas têm a função de estabelecer a comunicação entre o sistema de controle de solo e os satélites controlados durante os períodos em que estes sobrevoam a região de visibilidade de suas antenas de rastreo. Durante períodos de visibilidade de um dado satélite o sinal transmitido por ele é captado pela antena da estação, sendo estabelecido um enlace descendente de telecomunicação. Esse sinal contém, devidamente codificadas, as informações de telemetria que revelam, por exemplo, o estado atual de funcionamento do satélite, temperaturas em pontos relevantes, medidas dos sensores de atitude, etc. Uma vez estabelecido o enlace descendente, a estação estabelece também um enlace ascendente, que é utilizado para envio de telecomandos e execução de medidas de rastreo (distância e velocidade). O sinal do satélite recebido pelas estações de rastreo é transmitido, em tempo real, ao CCS, através da rede dedicada de comunicação de dados. No CCS, as mensagens de telemetria contidas no sinal do satélite são decodificadas, exibidas em tempo real aos controladores de satélites e, ao mesmo tempo, armazenadas em arquivos históricos da missão. No sentido contrário, os telecomandos gerados e enviados, através da rede de comunicação de dados, pelo

CCS são recebidos em tempo real pela estação que, por sua vez, os transmite ao satélite. Medidas de rastreo (distância entre a estação e o satélite e desvio Doppler), necessárias ao processo de determinação de órbita do satélite também são geradas durante os sucessivos períodos de contato.

O processo de determinação de órbita tem a função de manter atualizado um nível adequado de conhecimento em solo sobre a localização de cada satélite controlado. Através de programas computacionais de dinâmica de vôo são gerados no CCS, periodicamente, - a partir dos resultados do processo de determinação de órbita - arquivos de órbita predita e de previsão das próximas passagens dos satélites sobre as estações, incluindo estimativas dos ângulos de apontamento das antenas das estações de rastreo para direcioná-las ao satélite, de modo a capturar de seu sinal. Isso permite que as antenas sejam adequadamente posicionadas para a aquisição do sinal logo no início de cada passagem de satélite, garantindo o pronto estabelecimento da comunicação solo-bordo.

Por ser a unidade do INPE responsável pelas operações de controle de seus satélites, o CRC tem, nas atividades operacionais, a sua função básica e o seu objetivo final. A realização destas atividades envolve não somente a fase de operação de rotina dos satélites, propriamente dita, mas também as fases de preparação para o controle e suporte a lançamentos. Estas últimas envolvem, principalmente, a adequação da infra-estrutura de solo, a preparação de planos e procedimentos operacionais, o treinamento de pessoal e a realização de ensaios simulados das atividades de suporte ao lançamento e órbitas iniciais.

4.1. O Centro de Controle de Satélites

Todas as ações de controle são planejadas, coordenadas e executadas a partir do CCS. Pouco antes do início de cada período de visibilidade de um satélite à estação de rastreo primária (Cuiabá), o CCS conecta-se à estação por meio da rede de comunicação de dados, ficando habilitado a receber, em tempo real, os dados de telemetria contidos no sinal do satélite, bem como a enviar telecomandos ao veículo e comandar a execução de medidas de rastreo. O CCS assume o controle do satélite, imbuído da responsabilidade de tarefas rotineiras tais como, monitorar e analisar a telemetria recebida, enviar telecomandos para configurar operacionalmente o satélite, executar sessões de medidas de rastreo, e por tarefas consideradas mais críticas, como execução de manobras de correção de órbita e manobras de correção da orientação do satélite no espaço (atitude). A figura 9 apresenta uma



Figura 9 - Vista parcial da sala de controle principal do CCS



Figura 10. O chefe da equipe de dinâmica de voo do ESOC protagoniza o início da construção do prédio do CCS em São José dos Campos

vista da sala de controle principal do CCS, de onde as atividades de controle de satélites são executadas. À esquerda, através da janela de vidro, pode ser vista a sala de dinâmica orbital.

É interessante relatar um fato marcante e curioso ocorrido em 1997, um ano antes da inauguração do CRC. Rolf Münch, chefe da Divisão de Dinâmica de Voo do ESOC (ESA Space Operation Center), o centro de operações espaciais da ESA, esteve na sede do INPE. Ele integrava uma comitativa de especialistas com o objetivo de participar, como revisores, da Revisão Crítica de Projeto (CDR) do sistema de solo para controle dos satélites, na época em fase de desenvolvimento. Levado, pelo então gerente do Segmento Solo da MECB e atual chefe do CRC para conhecer o local onde seria construído o prédio do futuro Centro de Controle de



Figura 11. Fachada do prédio do CCS

Satélites o visitante perguntou onde se encontrava a pedra fundamental do prédio. Informado sobre a não existência dela, ele teve uma reação interessante: tomou uma pá e um capacete de proteção junto a um funcionário que trabalhava no local e desferiu alguns golpes no solo simulando, em ato simbólico, o início das obras de construção do prédio do CCS. Este ato, hoje considerado como um importante e curioso marco do envolvimento do INPE com as atividades de operação de satélites artificiais, foi registrado em algumas fotos, uma delas apresentada na figura 10. A construção do prédio do CCS foi efetivamente iniciada poucos dias após esse fato, tendo sido concluída no ano seguinte (1998).

A figura 11 apresenta uma vista da fachada do prédio do CCS

4.1.1. O Primeiro Sistema Computacional do CCS

A arquitetura do sistema computacional do CCS consistia, no início, de dois processadores VAX 8350 da empresa norte-americana Digital Electronics Corporation – DEC, em configuração tipo “cluster”. Era responsável pela execução tanto das tarefas de operação de satélites propriamente ditas, executadas por meio do software aplicativo de tempo real do CCS, descrito na seqüência, quanto para as tarefas de dinâmica orbital, que não envolvem a execução em tempo real, isto é,

não necessitam ser executados durante os intervalos de tempo em que ocorrem os sucessivos contatos do segmento de solo com os satélites operados. A configuração tipo “cluster” dos processadores é um tipo de configuração na qual ambos operam conjuntamente, dividindo as tarefas de processamento de maneira tal que, para o usuário do sistema, tudo se passa como se houvesse apenas um processador trabalhando. Dentre as tarefas executadas em tempo real destacam-se as seguintes: recepção, monitoração e armazenamento de telemetria, codificação, envio e armazenamento de telecomandos, execução de medidas de rastreamento, monitoração do estado dos equipamentos, comunicação por mensagens de texto entre o CCS e as estações terrenas.

Em adição aos dois processadores VAX 8350, o CCS dispunha também de um VAX 11/780 que era usado para desenvolvimento de software.

4.1.2. O Software Aplicativo do CCS

Praticamente todo o software aplicativo para dar suporte às atividades operacionais do CCS foi desenvolvido integralmente no INPE. Neste contexto, dois grandes sistemas de software aplicativos são relevantes:

- O software aplicativo de tempo real, denominado Sistema de Controle de Satélites, conhecido pela sigla SICS;
- O software aplicativo de dinâmica orbital.

O SICS é o maior dos sistemas de software do CCS. Tem suas principais funções executadas em tempo real, durante as sucessivas passagens de satélites sobre estações de rastreamento. É, portanto, o software que realiza as tarefas relacionadas à recepção e armazenamento dos dados dos satélites em arquivos históricos de missões, bem como as tarefas destinadas a gerar os telecomandos cujas atuações a bordo permitem o controle, a partir do solo, do estado operacional do satélite e de parâmetros dinâmicos ligados à sua órbita e atitude.

O SICS armazena automaticamente nos arquivos históricos de missão de cada satélite controlado, passagem após passagem, desde sua injeção em órbita, todos os dados relacionados à missão, gerados por meio das atividades operacionais durante cada passagem. Cada arquivo histórico cobre, em consequência, o período integral da missão. Neles são armazenados pelo software aplicativo de tempo real todos os dados de telemetria recebidos, todos os telecomandos enviados, e todas as medidas de distância executadas durante todas as passagens do satélite sobre estações terrenas.

O desenvolvimento do SICS foi realizado segundo padrões do projeto de software da ESA, adaptados para uso no INPE. Esses padrões foram rigorosamente seguidos durante todo o processo de desenvolvimento do sistema. Inicialmente, o sistema foi decomposto em módulos, segundo as regras de projeto estruturado, cada módulo sendo distribuído a uma determinada equipe de desenvolvimento. Os projetos dos módulos e da documentação envolvida evoluíram de acordo com um rígido cronograma de desenvolvimento gerenciado por uma equipe de supervisão geral. Revisões formais de projeto, previstas no cronograma de desenvolvimento de cada módulo, permitiam a detecção e correção precoce de erros e defeitos, verificação das interfaces, e incorporação de aperfeiçoamentos, tanto no projeto em si, quanto na documentação envolvida. Havia um rigoroso controle de versões para evitar a incorporação desordenada de alterações. Cada vez que uma alteração era oficialmente incorporada, as páginas atualizadas da documentação afetadas por ela eram imediatamente distribuídas aos gerentes de projeto de módulos, de modo que sempre trabalhassem com a versão mais atual de cada documento. Com isso, conseguiam um razoável controle do projeto de cada parte em particular, e uma adequada visão dos projetos dos outros módulos, facilitando o desenvolvimento de interfaces externas compatíveis.

O gerenciamento do projeto global, por sua vez, era dotado de uma satisfatória visão geral do projeto, e de um conveniente nível de controle sobre o desenvolvimento de cada módulo, o que permitia um adequado direcionamento do processo visando não apenas o cumprimento do cronograma instituído, mas também o necessário controle das interfaces entre os vários módulos. É um fator crítico para o sucesso de grandes projetos de desenvolvimento de software o fato que os módulos componentes são, normalmente, desenvolvidos separadamente, por equipes diferentes. Isso se deve ao fato que, em uma fase final, esses módulos devem ser integrados para funcionar conjuntamente, de modo harmônico, formando um único sistema global. Para que a integração pudesse ser realizada adequadamente, sem a ocorrência de surpresas desagradáveis, era imprescindível que as interfaces entre os módulos fossem corretamente desenvolvidas e controladas, através de um adequado nível de comunicação documentada durante todo o projeto.

Para o desenvolvimento desse grande sistema de software, dentro dos prazos impostos pelo estreito cronograma adotado para o projeto e face à sua magnitude, constatou-se a necessidade de contratação de mão de obra qualificada adicional para reforçar as equipes de funcionários do INPE, então insuficientes. Através de processo licitatório foi contratada uma empresa privada para o fornecimento

de mão de obra qualificada adicional. Essa contratação mostrou-se de extrema valia. Constituída de pessoal rigorosamente selecionado, com excelente competência técnica e elevado grau de profissionalismo, a equipe contratada incorporou-se rapidamente ao desenvolvimento de software do INPE, oferecendo uma importante parcela de contribuição ao sucesso do projeto. Alguns dos profissionais que participaram desse processo posteriormente prestaram concurso público, e, tendo sido aprovados, passaram a integrar formalmente o quadro de funcionários regulares do INPE.

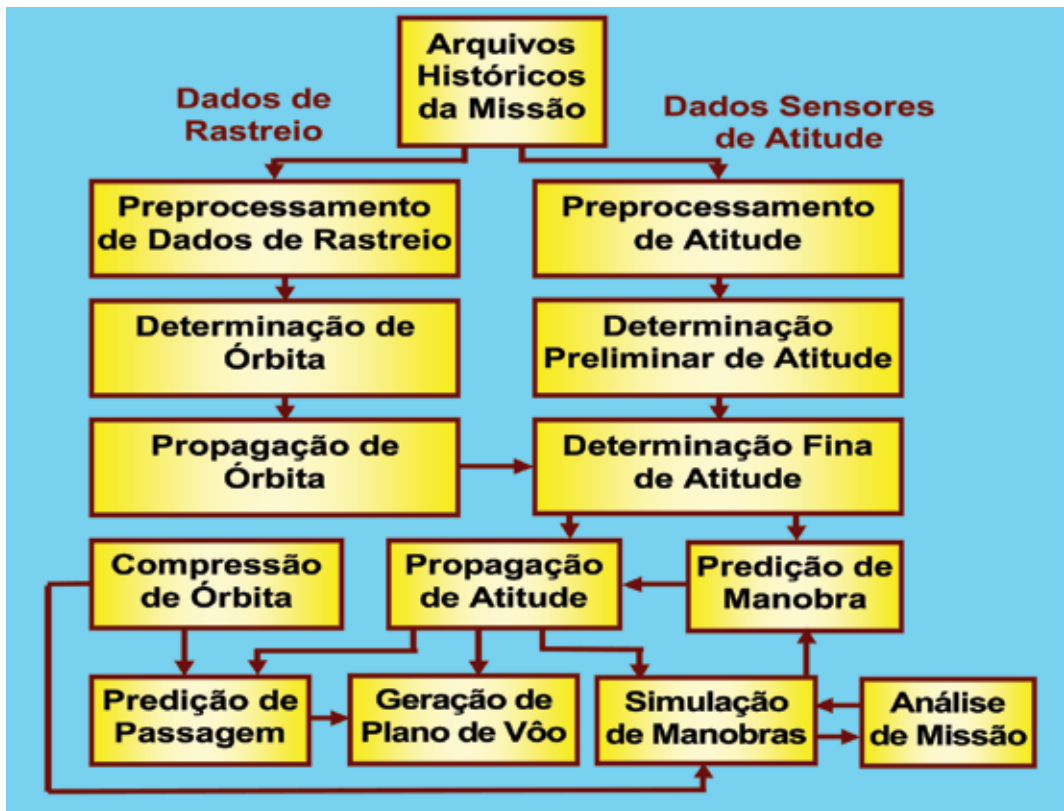
O SICS foi inicialmente desenvolvido em linguagem de programação FORTRAN. Uma idéia da magnitude do projeto do SICS é fornecida pelo número de linhas de código desse sistema de software: da ordem de cento e cinquenta mil.

O outro grande e importante pacote de software aplicativo do CCS, o de dinâmica orbital também foi desenvolvido originalmente em FORTRAN, em um sistema DEC VAX 11/780. Uma de suas características é não operar em tempo real, mas sim a partir de arquivos históricos de missão, que contém medidas de rastreo e dados de telemetria gravados pelo SICS durante as sucessivas passagens de satélites sobre as estações terrenas. Esses arquivos históricos são específicos para cada missão, isto é, cada satélite possui seu próprio conjunto dedicado de arquivos históricos. A telemetria dos satélites SCD1 e SCD2 contém, entre outros, os dados de seus sensores de atitude (dois sensores solares digitais e um magnetômetro de três eixos) e são periodicamente recuperados dos arquivos históricos e utilizados em um processo de determinação de atitude dos satélites, por meio do sistema de dinâmica orbital do CCS. As medidas de rastreo são utilizadas no processo de determinação de órbita, através do qual o conhecimento da órbita do satélite é periodicamente atualizado e mantido dentro de requisitos pré-estabelecidos de precisão. Os resultados deste processo servem de entrada (condição inicial) ao processo de propagação de órbita, que utiliza uma sofisticada modelagem da dinâmica do movimento orbital para gerar previsões da posição e velocidade do satélite em instantes futuros. As previsões são usadas no cálculo de dados de passagens futuras dos satélites controlados sobre as estações de rastreo utilizadas no processo, incluindo estimativas dos valores dos ângulos segundo os quais a antena de rastreo da estação deve ser direcionada, para captar o sinal emitido pelo satélite. As previsões de dados de apontamento de antena, calculados neste processo são suficientemente precisas para garantir a pronta aquisição do sinal do satélite por uma estação terrena, mesmo em passagens que só ocorrerão após períodos de mais de mês, passados desde a geração das predições.

As funções básicas e o modo de operação do Sistema de Dinâmica Orbital do CCS são ilustrados na figura 12. Como brevemente mencionado no parágrafo anterior, esse sistema opera em tempo não real, a partir de medidas dos sensores de atitude do satélite (no caso dos satélites de coleta de dados) e de medidas de distância e medidas Doppler, ambas recuperadas dos arquivos históricos da missão.

Existem dois processos básicos executados pelo sistema de dinâmica orbital: a determinação de órbita e a determinação de atitude. Para o SCD1 e SCD2 ambos são executados uma vez por semana no CCS. Para o CBERS-2, porém, somente o processo de determinação de órbita é executado em solo, com a frequência de uma vez a cada três dias. O processo de determinação de atitude não é realizado em solo para satélites CBERS, devido ao fato que eles são equipados por um sistema autônomo de controle de atitude, que o executa automaticamente a bordo, como parte das funções do sistema de controle autônomo. Os resultados do processo determinação de atitude a bordo são enviados ao solo como parte da telemetria.

Figura 12. Sistema de dinâmica orbital do CCS



O processo de determinação de órbita é efetuado em duas etapas básicas:

- Pré-processamento dos dados de rastreo;
- Estimação de órbita.

A função do pré-processamento é preparar os dados para alimentar o processo de estimação de órbita, através da aplicação, a estes, de procedimentos de validação, compressão, calibração e conversão para unidades de engenharia.

Quanto à estimação de órbita esta, por sua vez, consiste basicamente da aplicação de um procedimento de estimação de estado de mínimos quadrados aos dados preprocessados, de modo a obter a melhor órbita que a eles se ajusta. O modelo de forças utilizado nesse processo considera os efeitos do geopotencial, ajustável 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 software de determinação de órbita foi exaustivamente testado, antes de sua efetiva utilização ao controle dos satélites do INPE. Os resultados foram comparados com os obtidos por softwares equivalentes utilizados por outras importantes instituições espaciais internacionais. A análise dos resultados mostrou um excelente desempenho, situando o software desenvolvido no INPE no mesmo nível de qualidade de seus similares estrangeiros.

O processo de determinação de atitude dos satélites SCD1 e SCD2 compreende as seguintes etapas:

- Pré-processamento dos dados dos sensores de atitude;
- Determinação preliminar de atitude;
- Determinação fina de atitude.

O pré-processamento é aplicado isoladamente a cada conjunto de dados dos sensores de atitude coletado em cada passagem do satélite ocorrida na semana anterior à aplicação do procedimento. Nesta etapa os dados coletados em cada passagem são reduzidos a:

- algumas estimativas do ângulo entre o eixo de rotação e a direção do campo magnético da Terra;
- uma estimativa do ângulo de aspecto solar;
- uma estimativa da velocidade de rotação do satélite.

Em seguida é aplicada a segunda etapa do processo: a determinação preliminar de atitude, cujas entradas consistem dos resultados do pré-processamento. Nesse segmento é gerada uma estimativa do vetor velocidade angular do satélite para cada passagem dele sobre estações terrenas ocorridas no período coberto pe-

los dados utilizados, no caso uma semana.

Finalmente, aos resultados da determinação preliminar é aplicada a determinação fina de atitude, terceira e conclusiva etapa do processo. Aqui são geradas:

- uma estimativa refinada do vetor velocidade angular;
- uma estimativa do momento magnético residual do satélite (principal causa da precessão do eixo de rotação);
- uma estimativa do parâmetro de Foucault (principal causa do decaimento da velocidade de rotação do satélite), a qual é substituída nas equações dinâmicas utilizadas no processo de propagação de atitude para a incrementar sua precisão.

Tanto a propagação de órbita quanto a de atitude mantém arquivos de dados que abrangem todo o período passado da missão e ainda, um período futuro de três meses. Estes dados são utilizados para a geração, a cada três semanas, de arquivos contendo dados de previsão das próximas passagens do satélite correspondente sobre cada uma das estações terrenas envolvidas no rastreo. Esses arquivos de previsão de passagens são periodicamente enviados às estações de rastreo, onde são usados para o apontamento das antenas na direção do satélite, de modo que o enlace de comunicação entre o sistema de solo e o satélite possa ser estabelecido prontamente, em cada passagem prevista.

Outra função dos arquivos de previsão de passagem é servir de entrada para um software que gera, automaticamente, o plano de operação em vôo a ser seguido em cada uma das passagens futuras previstas. O plano de operação em vôo lista cronologicamente, para um determinado período, todas as ações de controle a serem executadas com o satélite em cada passagem futura contida no arquivo de previsão de passagem usado como entrada em seu processo de geração, como por exemplo: telecomandos a serem enviados, telemetrias a serem monitoradas e medidas de rastreo a serem executadas. O desenvolvimento do software de geração automática de planos de operação em vôo constituiu um importante passo em direção à automatização das atividades operacionais do CCS. Deve ser ressaltado, porém, que os programas desenvolvidos para essa finalidade, e que se encontram atualmente em uso no CCS, foram desenvolvidos para atender à operação de um satélite específico. Para cada novo satélite que entre em operação deve ser desenvolvido um novo programa gerador de plano de vôo, específico para ele. Alguns trabalhos de pesquisas estão, entretanto, sendo elaborados no INPE, com a participação do CRC e envolvem a aplicação de metodologias de inteligência artificial no desenvolvimento de software para geração automática de planos de operação em

vôo de satélites artificiais. Os primeiros resultados se mostraram bastante promissores, tendo sido desenvolvido um software experimental, de caráter geral que, teoricamente, pode ser aplicado a qualquer satélite, através da definição de arquivos de entrada específicos.

4.2. As Estações de Rastreamento de Satélites do CRC

As estações de rastreamento são as unidades do CRC responsáveis pelo estabelecimento e manutenção da ligação de telecomunicações entre o solo e o satélite. É nas estações de rastreamento que se localizam a antena de rastreamento e os equipamentos necessários para a recepção do sinal transmitido pelo satélite (contendo os dados de telemetria que permitem a monitoração, em solo, de seu estado de funcionamento) e, no sentido oposto, para o estabelecimento de uma ligação ascendente com o satélite, necessária ao envio de telecomandos e execução de sessões de medidas de rastreamento. Conforme já mencionado antes, o CRC possui duas estações de rastreamento: a estação de Cuiabá, situada no estado de Mato Grosso, e a de Alcântara, no estado



Figura 13. Estação de rastreamento de Cuiabá



Figura 14. Estação de rastreo de Alcântara

do Maranhão. Essas duas estações são conectadas ao CCS por meio de uma rede dedicada de comunicação de dados.

A escolha de Cuiabá para a localização geográfica de uma das estações de rastreo foi feita devido ao fato de que ali se situa o centro geodésico da América do Sul. Esta posição geográfica privilegiada possibilita a cobertura, por suas antenas, de praticamente todo o território brasileiro e grande parte do território da América do Sul. Uma foto da estação de rastreo de Cuiabá é apresentada na figura 13.

Quanto à escolha de Alcântara, para a localização da outra estação, ela deveu-se ao fato de que o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) aí se localiza. A estação de Alcântara foi desenvolvida dentro dos próprios limites da área do CLA. Sua localização permite o rastreo de satélites lançados desse centro desde o instante de sua injeção em órbita. A figura 14 apresenta uma vista da estação de Alcântara.

Cada estação de rastreo era, no início, equipada com um computador micro-VAX II da DEC. Alguns dos outros equipamentos e software foram projetados e construídos no próprio INPE como, por exemplo, o sistema de medidas de distância, o decodificador de telemetria, o conversor de protocolo para implementação

do formato X-25, que encapsula o protocolo de comunicação de dados SDID da ESA, o software de controle da antena de rastreamento. Outros foram comprados de fornecedores externos como o codificador de telecomandos, fabricado pela empresa alemã Dornier e o sistema de antena de rastreamento, manufaturado pela empresa norte-americana Scientific Atlanta.

O sistema de antena de ambas as estações foi adquirido em 1986, mas somente um ano após a aquisição, o Departamento de Estado Norte-Americano concordou, depois de um exaustivo processo de negociação, em conceder à empresa fabricante (Scientific Atlanta) a necessária licença de exportação.

O pessoal técnico que compôs as equipes de operação tanto da estação de Cuiabá quanto da de Alcântara foi contratado antecipadamente, para que houvesse tempo de serem submetidos a um período de treinamento, antes do início efetivo de suas atividades operacionais e, para isso, permaneceram no CCS, em São José dos Campos, até a inauguração das estações.

As estações de rastreamento do INPE iniciaram a operação em final de 1991, quando foram submetidas a um processo de validação e calibração. Esse processo contou com a cooperação do centro de operações de satélites da ESA, o ESOC, que disponibilizou ao INPE um de seus satélites para o rastreamento por Cuiabá e Alcântara: o Hipparcos, em órbita altamente elíptica, que foi o primeiro satélite a ter como missão principal medir a posição de estrelas. O processo de calibração consistiu do rastreamento do Hipparcos e geração de medidas de rastreamento (distância, no caso) pelas estações do CRC, durante um determinado período. As medidas geradas foram então enviadas ao ESOC, onde foram processadas pelo software de determinação de órbita desse centro. Paralelamente, medidas de rastreamento do Hipparcos geradas pelas estações de rastreamento da ESA, cobrindo o mesmo período que o das medidas do CRC, foram também processadas pelo mesmo software. A comparação dos resultados dos dois processos permitiu validar o equipamento de medida de distância das estações, já que os resultados obtidos com a utilização das medidas geradas pelo CRC ficaram bastante próximos daqueles obtidos com o uso das medidas correspondentes geradas pelas estações do próprio ESOC. Dados de calibração dos equipamentos de medida de distância de Cuiabá e Alcântara, que consistem de valores de atrasos de propagação do sinal eletromagnético nos equipamentos e guias de onda, também foram estimados nesse processo.

Curiosamente, alguns anos mais tarde, o CRC desempenhou um papel inverso ao da cooperação com o ESOC em um processo de calibração de estações terrenas. Daquela vez foi o INPE que forneceu um de seus satélites, o SCD1, para

os processos de calibração da estação de rastreamento chinesa de Nanning e da estação argentina de Córdoba. O CRC participou ativamente dos trabalhos relativos a essas cooperações, tendo desempenhado um papel similar ao que o ESOC desempenhara com relação às calibrações de Cuiabá e de Alcântara.

Um outro fato importante a ser destacado é que as obras de construção da estação terrena de Alcântara sofreram um atraso de um ano em relação à da estação de Cuiabá. Em 1993, quando do lançamento do SCD1, a estação de Alcântara ainda não se encontrava em estado totalmente operacional. Somente podia efetuar operações de rastreamento passivas, como recepção de telemetria, por exemplo, não dispondo, ainda, das capacidades de transmissão de telecomandos e de execução de medidas de rastreamento. Além disso, ainda não se encontrava conectada ao CCS pela rede de comunicação de dados.

Devido ao fato de existir uma intersecção entre as regiões de visibilidade das antenas de Cuiabá e Alcântara, na qual o satélite fica visível, ao mesmo tempo, por ambas as estações, foi definida uma prioridade de rastreamento para elas. Por motivos de caráter técnico e devido à maior facilidade de acesso, foi estabelecido que Cuiabá seria a estação primária nas atividades de controle. Assim, nos casos em que um satélite se encontra na região de visibilidade comum às duas estações, ficou determinado que o rastreamento deve ser executado prioritariamente por Cuiabá, com Alcântara operando apenas como estação redundante, para substituir Cuiabá em caso de falha desta.

Com o objetivo de criar um adequado nível de redundância, aumentado a confiabilidade do sistema de controle solo, foi criada nas estações de rastreamento a capacidade de substituir o CCS durante contactos com satélites. Desse modo, uma das estações pode assumir a responsabilidade pelo controle de satélites no CRC em caso de ocorrência de algum tipo de situação imprevista que impeça temporariamente o CCS de atuar, ou mesmo por algum tipo de necessidade operacional. Para prover essa capacidade, no sistema computacional de cada uma das estações foi instalada uma cópia do SICS, o software aplicativo de tempo real do CCS. Com isto, sempre que, por algum motivo, o CCS se encontrar impossibilitado de responder pelo controle de um ou mais satélites, a responsabilidade é temporariamente transferida para uma estação, normalmente a estação primária, Cuiabá. Um exemplo de tal situação é o caso de ocorrência de alguma falha técnica na rede de comunicação de dados que impeça o CCS de estabelecer contacto com uma ou mais estações. Como as estações de rastreamento são o elo de ligação entre o CCS e os satélites, o CCS teria impossibilidade de manter qual-

quer contacto com os veículos, através das estações afetadas pelo problema de comunicação, durante o período de tempo em que este persistir. Não poderia, dessa maneira, receber telemetria, enviar telecomandos, e comandar a execução de medidas de rastreio para alimentar o processo de determinação de órbita. A solução seria transferir integralmente o controle de satélites à estação primária até que a operação adequada da rede seja restabelecida. Em tal situação, os dados gerados nas sucessivas passagens de satélites são armazenados localmente na estação e, uma vez sanado o problema com a rede de comunicação de dados, são transmitidos ao CCS.

Essa capacidade das estações de rastreio de substituir o CCS permitiu, em complemento, reduzir o número de controladores de satélites em aproximadamente cinquenta por cento, através da transferência para a estação primária de todas as atividades de controle durante períodos de folgas, férias, ou mesmo ausências individuais de controladores do CCS.

4.3. Evolução Tecnológica do CRC

Como foi mencionado anteriormente, em 1988, ano de criação do CRC, as arquiteturas dos sistemas computacionais do CCS e das estações de rastreio baseavam-se em computadores DEC-VAX 8350 e microVAX II, respectivamente, além de um VAX 11/780 para desenvolvimento de software. Devido à grande velocidade de atualização tecnológica experimentada pelos computadores, ocorria com frequência de, ao ser concluído o processo licitatório para a aquisição de um sistema, o modelo escolhido já estar obsoleto, ou mesmo fora de linha de produção. Com isso, rapidamente os custos de manutenção desses equipamentos tornavam-se excessivamente elevados. Ao mesmo tempo, o incrível avanço tecnológico tornava as máquinas cada vez mais compactas e poderosas, em termos de capacidade de processamento e armazenamento de dados, mais econômicas em termos de consumo de energia elétrica e, em contradição, cada vez mais baratas. Isso fez com que, em alguns anos, o custo de manutenção dos computadores do CRC ficasse muito alto, chegando a um tal ponto em que a renovação anual do contrato de manutenção ficasse mais cara que o custo de aquisição de computadores novos e muito mais poderosos. Devido principalmente ao altíssimo custo de manutenção do sistema existente optou-se, em meados de 1995, pela sua substituição por outro mais avançado tecnologicamente. Para evitar incompatibilidades foi escolhido um outro sistema produzido pelo mesmo fabricante do existente, a DEC. Assim, as velhas

máquinas do CCS e das estações de rastreo foram substituídas por um novo sistema constituído, respectivamente, por um servidor DEC ALPHA-2100 e estações de trabalho DEC ALPHA-3000. Optou-se pelo sistema operacional Open-VMS, o mesmo utilizado no sistema anterior e, portanto, conhecido, de modo a minimizar modificações de código no software aplicativo para adaptá-lo ao novo sistema.

A necessidade de efetuar a migração dos softwares aplicativos de tempo real (SICS) e de dinâmica orbital do velho sistema computacional ao novo, sem interromper as atividades de controle do SCD1 constituiu-se de um relevante desafio. O principal problema relacionou-se com a diferença do tamanho de palavra que era de 32 bits no sistema antigo, e de 64 bits no novo. Durante um período experimental de validação, o software de dinâmica orbital foi executado paralelamente em ambos os sistemas, e os resultados eram comparados entre si. Em março de 1996, uma vez confirmado que o novo sistema apresentava um desempenho satisfatório, tanto em termos funcionais quanto de confiabilidade, o sistema antigo foi definitivamente desativado.

A tabela 1 apresenta, a título de comparação, os valores de alguns parâmetros de desempenho entre os dois sistemas computacionais: o antigo e o que o substituiu. Observe-se que o novo sistema, tanto do CCS quanto das estações de rastreo, apresenta oito vezes mais memória RAM que o antigo. Em termos de velocidade de processamento, o novo sistema do CCS era quase cinquenta vezes mais rápido que o anterior, enquanto que o novo sistema das estações era pouco mais de quarenta vezes mais rápido que o correspondente antigo. Para se ter uma idéia da diferença de desempenho, pode-se citar o processo de propagação de órbita, cuja execução demorava mais de três horas para ser concluída no sistema antigo e, no novo sistema ALPHA, levava da ordem de apenas 20 minutos.

Tabela 1. Comparação entre os sistemas computacionais do CRC.

	SISTEMAS COMPUTACIONAIS			
	Antigo		Novo	
	CCS	ETs	CCS	ETs
SISTEMA	2 VAX 8350	2 μ VAX II	2 ALPHA 2100	1 ALPHA 3000/300
RAM	16 MB	8 MB	128 MB	64 MB
DISCO	3 GB	100 MB	12 GB	1 GB
MIPS	4	3	190	130

Com base na experiência anterior com o SCD1 e SCD2, e levando em conta a grande evolução tecnológica dos computadores, foi decidido desenvolver um novo software aplicativo de tempo real para a operação do CBERS-1, usando a linguagem VISUAL C++, sob plataforma PC. Entretanto, o software de dinâmica orbital a ser utilizado para o CBERS-1, seria o mesmo utilizado para os satélites de coletas de dados, nas plataformas ALPHA.

Posteriormente foi desenvolvida também para o SCD1 e o SCD2 uma nova versão em PC do software aplicativo de tempo real. O software de dinâmica orbital também foi adaptado para execução em PC e, com, isso as estações de trabalho ALPHA foram totalmente substituídas por PC's, tanto no CCS quanto nas estações de rastreamento.

5. Comentários Finais

Após mais de quatorze anos desde o lançamento do SCD1, o primeiro satélite do INPE, o CRC apresenta evoluções técnica e humana que podem ser consideradas como muito positivas. A exemplo do SCD1, todos os satélites operados pelo CRC apresentaram (ou apresentam, ainda) um tempo de vida útil muito superior ao que era previsto antes de seus lançamentos. A longevidade destes satélites é, sem dúvida, resultado de uma alta competência tecnológica e do rigor empregado no processo de qualificação tanto para os componentes como para os subsistemas e sua integração. Mas, a esses fatores outros não menos importantes, como a grande competência dos processos operacionais, a enorme qualidade do software desenvolvido para o controle dos satélites no INPE, dos procedimentos operacionais desenvolvidos pelo CRC e das suas bem treinadas e eficientes equipes de controle. Neste cenário destaca-se também o aprimoramento da eficiência das atividades operacionais através da gradativa incorporação de novas tecnologias à medida que elas se tornavam disponíveis durante a vida útil dos satélites.

