

CAPÍTULO 7

RASTREIO E CONTROLE DE SATÉLITES

Pawel Rozenfeld*

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

* e-mail: pawel@ccs.inpe.br

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	7 - 5
1 INTRODUÇÃO	7 - 7
2 PORQUE CONTROLAR OS SATÉLITES EM ÓRBITA?	7 - 7
3 QUAIS SÃO OS MEIOS DE SOLO DE CONTROLE DE SATÉLITES?	7 - 8
4 CLASSIFICAÇÃO DAS MISSÕES ESPACIAIS	7 - 11
5 QUANDO COMEÇAM E EM QUE CONSISTEM AS ATIVIDADES DE PREPARAÇÃO DE CONTROLE?	7 - 13
6 MANUAL DE OPERAÇÃO DO SATÉLITE: ELO DE LIGAÇÃO ENTRE O SATÉLITE E SEU SISTEMA DE CONTROLE	7 - 16
7 SIMULADOR DE SATÉLITE	7 - 16
8 PLANO DE OPERAÇÕES DE VÔO	7 - 17
9 SOFTWARE DE CONTROLE DE SATÉLITE	7 - 19
10 EQUIPE DE CONTROLE DE VÔO	7 - 20
11 PREPARAÇÃO DA EQUIPE DE CONTROLE DE VÔO	7 - 21
12 TESTES PRÉ-LANÇAMENTO	7 - 21
13 FASES DE VIDA DO SATÉLITE EM ÓRBITA	7 - 22
14 OPERAÇÕES DE CONTROLE	7 - 23
15 BIBLIOGRAFIA	7 - 25
16 GLOSSÁRIO	7 - 26

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – ESTAÇÃO TERRENA DE CUIABÁ	7 - 9
FIGURA 3.2 – ANTENA DA ESTAÇÃO TERRENA DE ALCÂNTARA	7 - 9
FIGURA 3.3 – SALA DE CONTROLE PRINCIPAL DO CCS	7 - 11
FIGURA 5.1 – ESTAÇÕES TERRENAS COM POSSIBILIDADE DE SUPORTE AO SCD1	7 - 15
FIGURA 8.1 – PÁGINA DO PLANO DE OPERAÇÕES DE VÔO PARA O SATÉLITE SCD2	7 - 18

1 INTRODUÇÃO

As atividades de controle de satélites em órbita, na maioria das vezes, são complexas e dependem, em alto grau, do tipo da missão sendo controlada e do tipo de tecnologia disponível para o controle.

No que se segue é dada uma idéia dos fundamentos das atividades de controle de satélites que são aplicáveis para qualquer tipo de missão ou de tecnologia usada.

Pretende-se, também, fazer um apanhado da organização dos recursos humanos envolvidas nas atividades de controle e das ferramentas disponíveis para o treinamento da equipe e da organização das atividades de controle. Cumpre notar que o exposto neste trabalho é um dos modos de apresentar as atividades de controle e, certamente, não é único.

Espera-se, no entanto, que seja um modo, o mais claro possível, para alguém que tem o primeiro contato com as atividades de controle.

2 PORQUE CONTROLAR OS SATÉLITES EM ÓRBITA?

Por mais perfeito que seja o lançamento de satélite há vários fenômenos, independentes da ação do homem, que causam o afastamento do satélite de sua órbita desejada ou a perda de sua atitude programada. Como exemplos destes fenômenos podem-se citar:

Achatamento da Terra;

Arrasto da Atmosfera;

Pressão da Radiação Solar;

Atração do Sol e da Lua;

entre outros.

Para poder cumprir a missão com sucesso, os efeitos negativos destes fenômenos devem ser anulados ou diminuídos.

Por outro lado, para que o satélite em órbita possa cumprir com êxito sua missão, há necessidade de se interagir com os equipamentos de bordo. Como exemplos destas ações, podem-se citar:

- Calibrar a câmara de observação da Terra;
- Carregar o software no computador de bordo;
- Ligar/Desligar os propulsores;

entre outras.

Isto tudo mostra que há necessidade de se atuar sobre um satélite, i.e., controlá-lo em órbita para que se possa obter os resultados desejados da missão.

3 QUAIS SÃO OS MEIOS DE SOLO DE CONTROLE DE SATÉLITES?

Embora a evolução tecnológica dos satélites permita, hoje em dia, que muitas das ações de controle de satélite sejam executados pelo computador de bordo, os meios de solo de controle de satélites continuam sendo indispensáveis. Estes meios são constituídos pelas Estações Terrenas e pelo Centro de Controle de Satélites.

Estações Terrenas (ET's) são meios para se manter a todo o instante, o enlace radio-elétrico com o satélite. Estação Terrena é um sistema que permite rastrear o satélite, receber e datar dados de Telemetria, enviar num instante determinado Telecomandos, fazer e datar medidas de localização (ângulos, distância e velocidade).

Uma Estação Terrena é constituída por um sistema de antena, equipamentos de microondas, receptores, transmissores, equipamentos digitais, equipamentos de comunicação e computadores. Há, ainda, um sistema preciso de tempo e frequência.



Fig. 3.1 – Estação Terrena de Cuiabá



Fig. 3.2 – Antena da Estação Terrena de Alcântara

Centro de Controle de Satélites (CCS) é um meio para controlar o satélite. É um sistema que recebe das Estações Terrenas os dados de telemetria e de localização, processa e arquiva os mesmos, gera e encaminha às Estações Terrenas os telecomandos, determina e propaga órbita e atitude do satélite, prepara e executa as manobras, acompanha a evolução do comportamento dos equipamentos de bordo, gera os dados de apontamento das antenas das Estações Terrenas e planeja as atividades das mesmas.

O Centro é constituído, basicamente, por computadores e seus periféricos, com software dedicado para as funções descritas acima.



Fig. 3.3 – Sala de Controle Principal do Centro de Controle de Satélites

4 CLASSIFICAÇÃO DAS MISSÕES ESPACIAIS

Excluindo as missões interplanetárias não tratadas aqui, as missões espaciais podem ser classificadas pelos critérios descritos abaixo:

- Quanto ao tipo de órbita : Circular, Elíptica;
- Quanto à altura da órbita : Alta (HEO) – acima de 20.000km; Baixa (LEO) – abaixo de 2.000km; Média (MEO);
- Quanto à inclinação da órbita : Polar (próxima de 90°), Equatorial (próxima de 0°), Intermediária;
- Quanto a sua estabilização: por gradiente de gravidade, por rotação, em 3 eixos;
- Quanto ao número de satélites : Único, Constelação (vários satélites numa formação);
- Quanto à carga útil : Telecomunicações, Sensoriamento Remoto, Meteorologia, Científicos, Mistos.

As missões mais conhecidas são as seguintes:

- Telecomunicações
Geostacionários : HEO (35786km), equatorial, circulares, por rotação ou em 3 eixos. Ex: Brazilsat
Constelações : MEO/LEO, circulares. Ex.: GPS, Globalsat
Altamente Elípticos : Molniya, $i = 63,4^\circ$; 497kmx39380km;
- Sensoriamento Remoto : LEO, polar, circular, 3 eixos. Ex: CBERS;
- Meteorologia
Geostacionários : HEO, equatorial, circular, por rotação.
Ex: Meteosat
LEO, polar, circular. Ex: NOAA.
LEO, quase-equatorial, circular, por rotação. Ex: SCD1, SCD2

- Científico : LEO, equatorial, circular, em 3 eixos. Ex: FBM
- Coleta de Dados : LEO, quase-equatorial, circular. Ex: SCD1, SCD2

Para cada tipo de missão há um modo específico de controle.

5 QUANDO COMEÇAM E EM QUE CONSISTEM AS ATIVIDADES DE PREPARAÇÃO DE CONTROLE?

As atividades de preparação de controle começam a partir da definição da missão, alguns anos antes do lançamento. Primeiramente, faz-se uma análise da missão, levando em conta o tipo de lançador, local de lançamento, inclinação de órbita e carga útil do satélite.

Este estudo conduz à determinação do número e localização das Estações Terrenas que permitem maior tempo de visibilidade do satélite pelas mesmas bem como os meios de comunicação entre as Estações Terrenas e o CCS.

Exemplo :

- **órbitas polares (sensoriamento remoto)** – Estações perto dos polos são mais convenientes pois permitem contatos mais frequentes com os satélites;
- **órbitas equatoriais (telecomunicações)** – Estações perto do Equador são mais convenientes pela mesma razão.

Em seguida, faz-se o estudo da capacidade dos equipamentos e software das Estações Terrenas existentes e do Centro de Controle para atender aos requisitos da missão.

Caso necessário, há desenvolvimento de equipamentos e software das Estações Terrenas e do Centro de Controle de Satélites e/ou instalação de uma nova Estação Terrena.

A Figura 5.1 mostra o mapa mundi com as possíveis Estações Terrenas para o suporte do Satélite de Coleta de Dados 1 (SCD1) do INPE.

Em qualquer caso, há desenvolvimento de um simulador de satélites para o treinamento de pessoal bem como de um Plano de Operações de Vôo (POV), específico para cada missão.

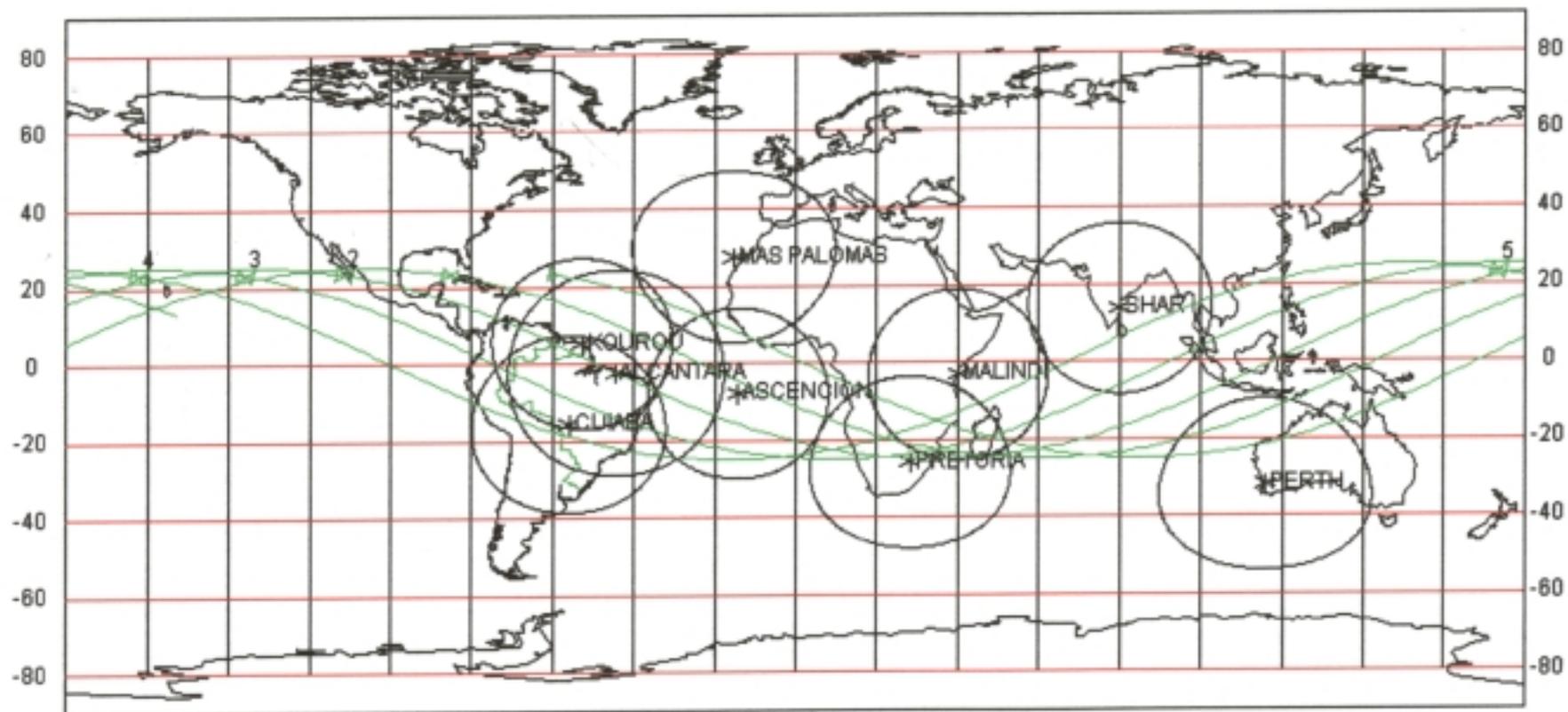


Fig.5.1 - Estações Terrenas com possibilidade de suporte ao SCD1.
 FONTE: Rozenfeld, P. (INPE - 3036 - NTE/215, pág.12)

6 MANUAL DE OPERAÇÃO DO SATÉLITE: ELO DE LIGAÇÃO ENTRE O SATÉLITE E SEU SISTEMA DE CONTROLE

O Manual de Operações do Satélite é um documento oficial que reúne todas as informações a respeito do satélite.

Descreve o satélite e sua missão; todos os subsistemas de satélites; suas telemetrias e telecomandos; curvas de calibração; modos de operação do satélite; transições entre vários modos de operação e apresenta uma análise de falhas dos equipamentos de bordo.

Este documento é básico para o desenvolvimento de software de controle, simulador e Plano de Operações de Vôo do satélite.

Este documento é preparado pela Gerência da Missão.

7 SIMULADOR DO SATÉLITE

É um software que simula de maneira mais real possível o comportamento do satélite em órbita, em todos os modos de operação, inclusive as possíveis falhas dos subsistemas de bordo.

O objetivo principal do simulador é treinar a Equipe de Controle de Vôo antes do lançamento, nas operações de controle: nominais e contingências.

É usado, também, para validar o Plano de Operações de Vôo antes e depois do lançamento. Em caso de falha de algum equipamento de bordo, permite reproduzir esta falha em solo e determinar as ações que tirem o satélite da condição de falha.

8 PLANO DE OPERAÇÕES DE VÔO

É um cronograma de atividades de cada um dos membros da Equipe de Controle de Vôo durante todas as fases de vida do satélite em órbita.

Além das atividades nominais apresenta também os Procedimentos de Recuperação de Contingências para as falhas previstas no Manual de Operação do Satélite.

A Figura 8.1 apresenta uma página do POV para o satélite SCD2 do INPE.

Passo	Tempo HH:MM:SS	Evento	Telecomando	ATIVIDADES			
				GOPSAT/ENSAT	CONSAT	ET	GERDIV
32	03:32:45	-CBA: AOS Nominal sat. em eclipse □ 4ª elevação <u>RHC</u>		-Se AOS sem TM: <u>PRC-101</u> -GOPSAT: Receber informações sobre AOS CBA: t = ___:___:___ GMT azim = ___ graus elev = ___ graus e informar <u>GERDIV</u>		CBA: -Estratégia de aquisição " <u>SCAN</u> " -Após AOS, informar GOPSAT: instante, azimute e elevação -Se expirar tempo de " <u>SCAN</u> " sem AOS <u>PRC-002</u>	
		-TM disponível no CCS (CBA)		-Verificar (tela-201): TM077: BCR1 on TM078: BCR2 off TM062: EOC enabled TM082: BDR1 on TM083: BDR2 off TM084: CONV1 on TM085: CONV2 off TM106: STRAP on TM105: TX1 off TM104: TX2 on TM086: TIMER off TM110: TQC off Se diferir: <u>PRC-102</u>	TM046: Ranging on TM107: COD 5V on TM108: COD 15V on TM109: COD-15V on TM101: OBC 5V off TM102: OBC 15V off TM103: OBC-15V off TM097: SS 5V on TM098: SS 15V on TM099: SS-15V on TM095: MAG on TM096: TX PCD off		
		-Verificação do ângulo de aspecto solar (AAS)		-Se leitura dos sensores solares for tal que: $\theta > 100^\circ$ ou $\theta < 80^\circ$ então: <u>PRC-062</u>	-Anotar leitura dos sensores solares TD353= _____ TD354= _____		
			Verificar valores fora de limites: <u>PCV-004</u>				

Fig.8.1 - Página do Plano de Operações de Vôo para o satélite SCD2.
FONTE: Orlando, V.; Galski, R. L. (CD2-PV-003)

9 SOFTWARE DE CONTROLE

As atividades da Equipe de Controle de Vôo são realizadas antes, durante e após a passagem do satélite sobre uma Estação Terrena. Conseqüentemente, o software de controle do satélite divide-se em duas categorias: software de tempo real (operada durante a passagem) e software off-line (operado pós-passagem). As atividades pré-passagem referem-se, geralmente, às calibrações do equipamento de solo e verificação do status de software.

Software de tempo real tem as seguintes funções:

- recepção de telemetrias;
- conversão em unidades de engenharia e sua visualização nos monitores;
- armazenamento de dados brutos e processados;
- análise de dados de TM (valores limites);
- geração de telecomandos;
- transmissão para Estações Terrenas;
- recepção e armazenamento de dados de localização.

Software off-line tem as seguintes funções:

- processamento de telemetrias de atitude;
- determinação de atitude;
- propagação de atitude;
- processamento de dados de localização;
- determinação de órbita;
- propagação de órbita;
- geração de previsões de passagens para a ET;

- preparação de manobras;
- estudo do comportamento temporal (tendência) do equipamento de bordo.

10 EQUIPE DE CONTROLE DE VÔO (ECV)

Durante a vida do satélite em órbita, o mesmo é controlado pela Equipe de Controle de Vôo descrita abaixo:

- **Diretor da Missão (DIRMIS)**
Autoridade máxima responsável pela missão. Durante o lançamento fica na Base de Lançamento. Coordena com os responsáveis pelo veículo lançador e da Base de Lançamento e o Diretor de Operações de Vôo, a conveniência de autorizar ou atrasar o lançamento.
- **Diretor de Operações de Vôo (DIROP)**
É autoridade máxima no Centro de Controle de Satélites. Responsável pela Operação de Satélites a partir de sua inserção em órbita e até o fim da Missão.
- **Gerente de Operações de Satélite (GOPSAT)**
Responsável pela elaboração do POV, requisitos de simulação da Missão e preparação dos conceitos de operação da Missão. É substituto do DIROP.
- **Engenheiro de Sistemas de Satélite (ENSAT)**
Responsável, na ausência do GOPSAT, pelo controle do satélite em órbita.
- **Controlador de Satélite (CONSAT)**
Auxilia nas operações de controle do satélite. Controla o satélite na fase de rotina.
- **Responsável pelo Software (RESOFT)**
Responsável pela integridade do software operacional.

- Gerente de Dinâmica de Voo (GERDIV)
Responsável pelas atividades da equipe de Dinâmica Orbital: determinação e propagação de atitude e órbita e preparação e avaliação de manobras.
- Operador da Estação Terrena (OPET)
Opera os equipamentos da Estação Terrena

11 PREPARAÇÃO DA EQUIPE DE CONTROLE DE VÔO (ECV)

O tempo de preparação da ECV depende da missão, mas compreende as seguintes fases:

1. Familiarização com a Missão. Explicação detalhada da missão e do satélite e seus subsistemas pelos membros da equipe de desenvolvimento do satélite.
2. Treinamento no software de controle do satélite, caso haja atualização do software de controle ou instalação de um software totalmente novo.
3. Treinamento com o simulador de satélite. O simulador é usado para cobrir todas as fases de vida do satélite em órbita. As atividades de controle seguem o POV.
4. Ensaio Geral: algumas semanas antes do lançamento toda a ECV inclusive todas as Estações Terrenas envolvidas participam do ensaio geral para treinar, principalmente, a fase de lançamento do satélite.

12 TESTES PRÉ-LANÇAMENTO

Antes de lançar o satélite em órbita, há testes que asseguram a compatibilidade do mesmo com os meios de solo de controle.

1. Testes com o satélite

Permite assegurar a compatibilidade do software de controle com os equipamentos de bordo. É feito com o modelo de vôo depois da integração do satélite no Laboratório de Integração e Testes (LIT) e antes de enviá-lo à base de lançamento. O Centro de Controle de Satélites envia telecomandos e recebe telemetrias do modelo de vôo assegurando, assim, a compatibilidade do software de controle com o satélite.

2. Teste com o modelo de Rádio Frequência (compatibilidade RF)

Permite assegurar a compatibilidade do sistema de comunicação e de processamento de bordo com a Estação Terrena. Este teste é feito entre o modelo de RF (maleta constituída por transponder e computador de bordo) e a Estação Terrena. Seu objetivo é verificar a compatibilidade de frequências, modulações e formatos entre o satélite e a ET. Os telecomandos são enviados à maleta e sua ação sobre o satélite é verificada. As telemetrias são geradas pela maleta, recebidas e verificadas na ET.

13 FASES DE VIDA DO SATÉLITE EM ÓRBITA

O satélite em órbita passa por várias fases de vida definidas abaixo:

1. Lançamento e Órbitas Iniciais (LEOP)

Esta fase é definida a partir do instante de injeção do satélite em órbita até a sua aceitação em órbita.

Objetivos da fase:

- determinação de atitude do satélite, importante para geração de energia de bordo;
- determinação da órbita, importante para saber localizar o satélite a qualquer instante e colocar o satélite na órbita definitiva (satélites de telecomunicações).

2. Aceitação em órbita

Esta fase é definida desde o fim do LEOP até a entrada na fase de rotina.

Objetivos da fase:

- testes com os equipamentos da plataforma;
- testes com os equipamentos de carga útil.

3. Fase de rotina

Esta fase é a de utilização plena do satélite quando o satélite cumpre a missão para a qual foi projetado.

4. Emergência

Pode interromper a qualquer instante as fases anteriores. Ex: perda da atitude, falha de um equipamento de bordo. Exige ações de recuperação.

5. Fim da vida útil

Quando cessa toda a comunicação com o satélite, seja pelo esgotamento de sua energia de bordo ou esgotamento do propelente, seja por efeito de alguma falha fatal.

Atualmente, quando atingida esta fase e para não congestionar as órbitas úteis, procura-se tirar o satélite da mesma e destruí-lo.

14 OPERAÇÕES DE CONTROLE

1. Algumas horas antes do lançamento do satélite, a última versão do software de controle é carregado nos computadores do Centro de Controle de Satélites e das

Estações Terrenas. Testes de comunicação entre o CCS e as Estações Terrenas são feitos.

2. Uma hora antes do lançamento o CCS envia às Estações Terrenas envolvidas no suporte ao lançamento, as previsões de passagens de satélite baseadas na órbita nominal. As previsões de passagens são cronogramas que a cada 30s dão o azimute e a elevação da antena que deve rastrear o satélite.
3. O satélite montado no último estágio do lançador pode estar ligado ou desligado. Quando está desligado, na separação do último estágio, o satélite é ligado pela chave de separação. Assim, quando o satélite passar sobre a 1ª Estação Terrena, sua antena consegue adquirir o sinal e receber sua telemetria. Isto é feito para facilitar o rastreamento inicial do satélite e assegurar o contato com o satélite, o mais próximo da separação.
4. No instante previsto para a aquisição do sinal pela 1ª Estação, a antena da mesma efetua um pequeno movimento em azimute e elevação para compensar uma possível dispersão no lançamento.
5. Havendo aquisição do sinal do satélite, os dados de telemetria são encaminhados ao CCS.
6. No Centro de Controle de Satélites a primeira preocupação é com o estado do sistema de atitude e energia a bordo do satélite. Imediatamente, disparam-se os sistemas de medida de velocidade e distância. A preocupação é em obter o máximo de dados para poder reconstituir a órbita real do satélite e garantir a geração de energia a bordo. Normalmente, nesta fase a carga útil do satélite está desligada.
7. Várias passagens do satélite são necessárias para determinar precisamente a órbita.

8. O estado de outros subsistemas são examinados.
9. A fase de determinação de atitude dura alguns dias.
10. Em seguida, passa-se a fase de determinação fina de órbita quando então são usados os propulsores de bordo. Há um rígido controle de gasto de propelente, pois a vida útil do satélite em órbita depende, em grande parte, da disponibilidade do mesmo a bordo. Esta fase dura alguns dias. Nesta fase pode ser ligada a carga útil.
11. Os passos seguintes são os testes de aceitação em órbita quando então todos os subsistemas de bordo são calibrados e testados. Pode durar algumas semanas.
12. Em rotina, há utilização plena da carga útil do satélite atendendo aos requisitos dos usuários da missão.

15 BIBLIOGRAFIA

Pisacane, V. L. Mission Operations. In: Pisacane, V. L.; Moore, R. C. ed. **Fundamentals of Space Systems**. New York: Oxford University Press, 1994. Cap. 14, p. 751-758.

Rozenfeld, P. **Manual de Organização do CRC: Parte 1: Organização Funcional, Parte 2: Organização Operacional**. São José dos Campos: INPE, 1990. 30 p. (OPR-GR-001)

Rozenfeld, P. **Definição Preliminar do Segmento de Solo da MECB**. São José dos Campos: INPE, 1984. 72 p.(INPE-3036-NTE/215)

Rozenfeld, P.; Orlando, V.; Schneider, E. M. Overview of INPE's Satellite Tracking and Control Center and Main Aspects of its Debut in Satellite Operations. **Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences**, v. 16, special issue, p. 421-425, 1994.

16 GLOSSÁRIO

Atitude: Orientação do satélite em relação a um dado sistema de coordenadas.

Azimute: Posição angular da antena no plano horizontal em relação ao Norte, contado no sentido horário.

Carga Útil: Conjunto de instrumentos de bordo do satélite necessários para executar sua missão.

Contingência: Estado dos equipamentos do satélite que não o nominal.

Elevação: Posição angular da antena em relação ao plano horizontal local.

Medidas de Localização: Dados que permitem determinar a posição ou velocidade do satélite em relação a uma Estação Terrena. São usados para determinar a órbita do satélite.

Órbita: Trajetória descrita pelo satélite em torno da Terra.

Passagem: Intervalo de tempo durante o qual o satélite é visível por uma Estação Terrena podendo manter o contato radioelétrico com a mesma.

Plataforma: Conjunto de equipamentos de bordo de satélites que fornecem a sua carga útil, suporte mecânico, apontamento adequado no espaço, energia e meios de comunicação com o solo.

Rastreio: Processo de acompanhar um satélite por meio da antena da Estação Terrena.
Pode ser automática ou programada.

Telecomando: Ordem enviada ao satélite a partir do solo.

Telemetria: Dados do satélite recebidos em solo.