

CAPÍTULO 2

COMO INTEGRAR E TESTAR AS PARTES DE UM SATÉLITE

Elbert E. N. Macau*
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

* e.mail: elbert@lit.inpe.br

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	2 - 7
1 INTRODUÇÃO	2 - 11
2 VIDA ÚTIL DE UM SATÉLITE	2 - 12
3 SATÉLITE DE COMUNICAÇÕES INTELSAT VI F-3	2 - 13
4 ATIVIDADES	2 - 15
5 LABORATÓRIOS MUNDIAIS	2 - 15
6 O QUE É MONTAGEM, INTEGRAÇÃO E TESTE DE SATÉLITES? ...	2 - 16
7 SEQUÊNCIA DE INTEGRAÇÃO	2 - 17
7.1 TESTE DE SUBSISTEMA	2 - 18
7.2 DISPONIBILIDADE PARA AIT	2 - 18
7.3 INSPEÇÃO	2 - 19
7.4 MONTAGEM MECÂNICA	2 - 19
7.5 INTEGRAÇÃO ELÉTRICA	2 - 20
7.6 ALINHAMENTO	2 - 21
7.7 TESTES DE INTEGRAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SENSORES	2 - 21
7.8 TESTES FUNCIONAIS E DE DESEMPENHO	2 - 22
8 TESTES AMBIENTAIS	2 - 23
8.1 TESTES DE EMI/EMC	2 - 24

8.2 MEDIDAS MAGNÉTICAS	2 - 25
8.3 PROPRIEDADES DE MASSA 1	2 - 26
8.4 TESTES DE VIBRAÇÃO	2 - 26
8.5 TESTES DE SEPARAÇÃO	2 - 27
8.6 ALINHAMENTO 2	2 - 27
8.7 TESTES FUNCIONAIS E DE DESEMPENHO 2	2 - 28
8.8 TESTES DE BALANÇO TÉRMICO	2 - 28
8.9 TESTES DE CICLAGEM TÉRMICA	2 - 29
8.10 TESTES DE PAINEL SOLAR	2 - 29
8.11 ALINHAMENTO 3	2 - 30
8.12 TESTES FUNCIONAIS E DE DESEMPENHO 3	2 - 30
8.13 PROPRIEDADES DE MASSA 2	2 - 31
8.14 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE	2 - 31
9 CAMPANHA DE LANÇAMENTO	2 - 32
9.1 ALINHAMENTO	2 - 32
9.2 TESTES DE DESEMPENHO	2 - 33
9.3 INTEGRAÇÃO COM VEÍCULO LANÇADOR	2 - 33
9.4 VERIFICAÇÃO FUNCIONAL E COMPATIBILIDADE COM O LANÇADOR	2 - 34
9.5 LANÇAMENTO	2 - 34

10 METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO E TESTES DE SATÉLITES	2 - 35
10.1 MODELO ESTRUTURAL (SM - STRUCTURAL MODEL)	2 - 35
10.2 MODELO TÉRMICO (TM - THERMAL MODEL)	2 - 36
10.3 MODELO DE ENGENHARIA (EM - ENGINEERING MODEL)	2 - 36
10.4 MODELO DE QUALIFICAÇÃO (QM - QUALIFICATION MODEL)	2 - 36
10.5 MODELO DE VÔO (FM - FLIGHT MODEL)	2 - 37
11 SISTEMAS ESPECIAIS PARA AIT	2 - 37
11.1 EQUIPAMENTO ELÉTRICO PARA SUPORTE TERRESTRE (EGSE - ELECTRICAL GROUND SUPPORT EQUIPMENT)	2 - 37
11.1.1 EQUIPAMENTO DE VERIFICAÇÃO GLOBAL (OCOE - OVERALL CHECKOUT EQUIPMENT)	2 - 38
11.1.2 EQUIPAMENTO DE VERIFICAÇÃO ESPECÍFICA (SCOE - SPECIAL CHECKOUT EQUIPMENT)	2 - 38
11.2 EQUIPAMENTOS MECÂNICOS PARA SUPORTE TERRESTRE (MGSE - MECHANICAL GROUND SUPPORT EQUIPMENT)	2 - 38
12 OUTRAS ATIVIDADES DO LIT	2 - 38
12.1 QUALIFICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS DE ALTA TECNOLOGIA	2 - 39
12.2 TREINAMENTO EM ÁREAS ESPECÍFICAS	2 - 40
12.3 DESENVOLVIMENTO	2 - 40
12.4 PESQUISA	2 - 41
13 CONCLUSÃO	2 - 41

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - A) VISTA DO SCD-1, B) SCD-1 SENDO INTEGRADO AO VEÍCULO LANÇADOR, C) SCD-1 SENDO LANÇADO	2 - 11
FIGURA 2 - VISÃO PANORÂMICA DO LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES	2 - 12
FIGURA 3 - A) ESFORÇOS DINÂMICOS DURANTE O LANÇAMENTO, B) CONDIÇÕES TÉRMICAS EM ÓRBITA	2 - 12
FIGURA 4 - A) ASTRONAUTAS DA ENDEAVOUR RECUPERANDO O INTELSAT VI F-3 A FIM DE SER REPARADO, B) ESQUEMA DE CAPTURA DO SATÉLITE, C) ESQUEMA DE ATRACAMENTO DO SATÉLITE	2 - 14
FIGURA 5 - RELAÇÃO DE LABORATÓRIOS DE INTEGRAÇÃO E TESTES DE SATÉLITES EXISTENTES NO MUNDO. EM VERMELHO: INSTITUIÇÕES GOVERNAMENTAIS; EM PRETO: INSTITUIÇÕES PRIVADAS.....	2 - 16
FIGURA 6 - ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE UM SATÉLITE	2 - 17
FIGURA 7 - SEQUÊNCIA DE INTEGRAÇÃO	2 - 17
FIGURA 8 - TESTE DE SUBSISTEMA	2 - 18
FIGURA 9 - MODELO ESTRUTURAL DO CBERS SENDO INSPECIONADO	2 - 19
FIGURA 10 - INSPEÇÃO DOS SUBSISTEMAS DO MICROSSATÉLITE SACI-1	2 - 19
FIGURA 11 - MONTAGEM MECÂNICA DO SATÉLITE SCD-2	2 - 20
FIGURA 12 - INTEGRAÇÃO ELÉTRICA DO SATÉLITE SCD-2	2 - 21
FIGURA 13 - ALINHAMENTO DO SATÉLITE SAC-B	2 - 21
FIGURA 14 - TESTE DE INTEGRAÇÃO NO SATÉLITE SCD-1	2 - 22
FIGURA 15 – SATÉLITE SCD-1 EM CONFIGURAÇÃO DE TESTE FUNCIONAL	2 - 23

FIGURA 16 - SEQUÊNCIA DE TESTES AMBIENTAIS	2 - 24
FIGURA 17 - TESTE DE EMI-EMC NO SATÉLITE SAC-B	2 - 25
FIGURA 18 – SATÉLITE SCD-2 NO INTERIOR DA CÂMARA ANECÓICA	2 - 25
FIGURA 19 - BALANCEAMENTO DINÂMICO DO SATÉLITE SCD-1 ...	2 - 26
FIGURA 20 - MODELO MECÂNICO DO SATÉLITE SAC-B EM PREPARAÇÃO PARA ENSAIO DE VIBRAÇÃO	2 - 26
FIGURA 21 – SATÉLITE SCD-2 SENDO PREPARADO PARA O TESTE DE SEPARAÇÃO	2 - 27
FIGURA 22 – SATÉLITE SAC-B SENDO ALINHADO	2 - 28
FIGURA 23 – SATÉLITE SCD-1 EM CONFIGURAÇÃO DE TESTE FUNCIONAL	2 - 28
FIGURA 24 – SATÉLITE SAC-C SENDO PREPARADO PARA TESTES TÉRMICOS NO VÁCUO	2 - 29
FIGURA 25 – SATÉLITE SAC-B SENDO POSICIONADO NA CÂMARA DE TESTES TÉRMICOS NO VÁCUO.....	2 - 29
FIGURA 26 - INSPEÇÃO DE PAINÉIS SOLARES	2 - 30
FIGURA 27 – SATÉLITE SAC-B EM PROCESSO DE ALINHAMENTO	2 - 30
FIGURA 28 - TESTES FUNCIONAIS DO SATÉLITE SCD-2	2 - 31
FIGURA 29 - BALANCEAMENTO MECÂNICO DO SATÉLITE SCD-2	2 - 31
FIGURA 30 - A) SCD-2 SENDO ARMAZENADO NO CONTAINER DE TRANSPORTE, B) SCD-2 SENDO TRANSPORTADO PARA O AEROPORTO, C) SCD-2 SENDO EMBARCADO PARA A BASE DE LANÇAMENTO	2 - 32
FIGURA 31 - SEQUÊNCIA DE TESTES DURANTE A CAMPANHA DE LANÇAMENTO	2 - 32
FIGURA 32 - ALINHAMENTO DO SATÉLITE SAC-B	2 - 33

FIGURA 33 - TESTE DE DESEMPENHO SENDO EXECUTADO NO SATÉLITE SCD-2	2 - 33
FIGURA 34 - INTEGRAÇÃO DO SATÉLITE SCD-2 COM O VEÍCULO LANÇADOR	2 - 34
FIGURA 35 - VERIFICAÇÃO FUNCIONAL E TESTE DE COMPATIBILIDADE ENTRE O SATÉLITE SCD-2 E O VEÍCULO LANÇADOR	2 - 34
FIGURA 36 – SATÉLITE SCD-2A PRONTO PARA SER LANÇADO	2 - 35
FIGURA 37 - ÁREAS DE ATUAÇÃO DO LIT	2 - 40

1 INTRODUÇÃO

Em 9 de fevereiro de 1993, o Brasil entrou para o seleto clube das nações que possuem tecnologia para desenvolver satélites artificiais. Nesta data, o **Satélite de Coleta de Dados 1 (SCD-1)** - primeiro satélite totalmente desenvolvido no Brasil - foi lançado, com sucesso! Minutos após o lançamento seus sinais foram captados pelas estações terrenas de rastreamento. Com um tempo de vida útil estimado de um ano, até hoje o SCD-1 encontra-se em operação!

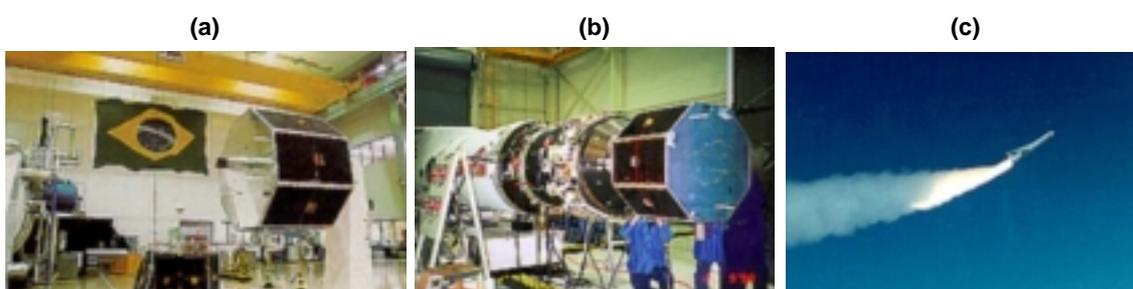


Fig. 1 - a) Vista do SCD-1; b) SCD-1 sendo integrado ao veículo lançador; c) SCD-1 sendo lançado.

FONTE: Relatório de atividades do INPE.

O sucesso completo que vem marcando as atividades do **SCD-1** deve ser creditado, em grande parte, às atividades do **Laboratório de Integração e Testes - LIT**. O LIT foi especialmente projetado e construído para atender as necessidades do programa espacial brasileiro. Hoje, representa um centro de excelência relevante para o desenvolvimento tecnológico de nosso País. Nas seções que se seguem, você conhecerá parte das atividades que são desenvolvidas no âmbito do LIT em relação a montagem, integração e testes de satélites.

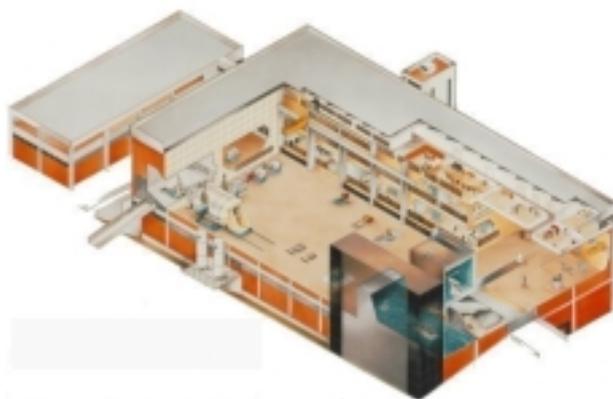


Fig. 2 - Visão Panorâmica do Laboratório de Integração e Testes
 FONTE: Relatório de atividades do INPE, folheto do INPE.

2 VIDA ÚTIL DE UM SATÉLITE

Um **satélite**, durante sua vida útil, é submetido às condições ambientais extremamente hostis. Durante o lançamento, ele está sujeito a níveis de aceleração que podem chegar a **20 vezes** o valor da aceleração proveniente da gravidade na superfície da terra (**g**). Além disso, durante a separação entre os estágios do lançador, os choques resultantes induzem vibrações instantâneas que podem chegar a até **6.000 vezes** o valor da aceleração da gravidade (**g**).

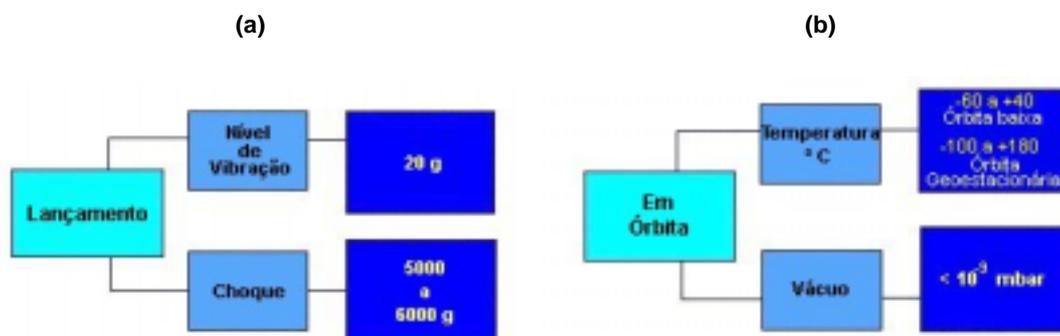


Fig. 3 - a) Esforços dinâmicos durante o lançamento;
 b) Condições térmicas em órbita.
 FONTE: LIT/INPE

Durante a operação em órbita, o satélite está exposto a um ambiente de vácuo e sujeito a variações extremas de temperatura ao longo de sua órbita, que podem variar entre **-100 a + 180° C**. Apesar de condições tão adversas, espera-se que um satélite funcione por

anos seguidos, devido aos altos custos envolvidos, o que representa um prodigioso empreendimento de engenharia.

A estrutura deve ser capaz de resistir aos esforços dinâmicos; os sistemas de controle de temperatura precisam manter cada subsistema dentro da faixa de temperatura que permita seu adequado funcionamento; cada subsistema deve ser propriamente testado, de forma que seja mínima a possibilidade de apresentar falha; o sistema deve funcionar harmoniosamente, de forma a cumprir sua missão ao longo de anos!

3 SATÉLITE DE COMUNICAÇÕES INTELSAT VI F -3

Se um satélite em órbita deixar de funcionar, as conseqüências poderão ser muito graves. Milhões de dólares se perderiam, serviços essenciais envolvendo redes de comunicação e informação ficariam comprometidos, milhares de pessoas terminariam sendo afetadas, de alguma forma. Reparar um satélite em órbita é uma tarefa se não impossível, extremamente difícil e custosa.

Em **março de 1992**, o satélite de comunicações *Intelsat VI F-3* foi recuperado pelo ônibus espacial *Endeavour* a fim de ter seu motor de apogeu, que não havia funcionado, substituído. A operação redundou em sucesso, porém foi extremamente delicada e envolveu milhões dólares. Só foi empreendida pelo fato da *Intelsat* necessitar urgentemente de um satélite para cobrir as Olimpíadas de Barcelona. Entretanto, este foi um caso isolado que não se repetiu.

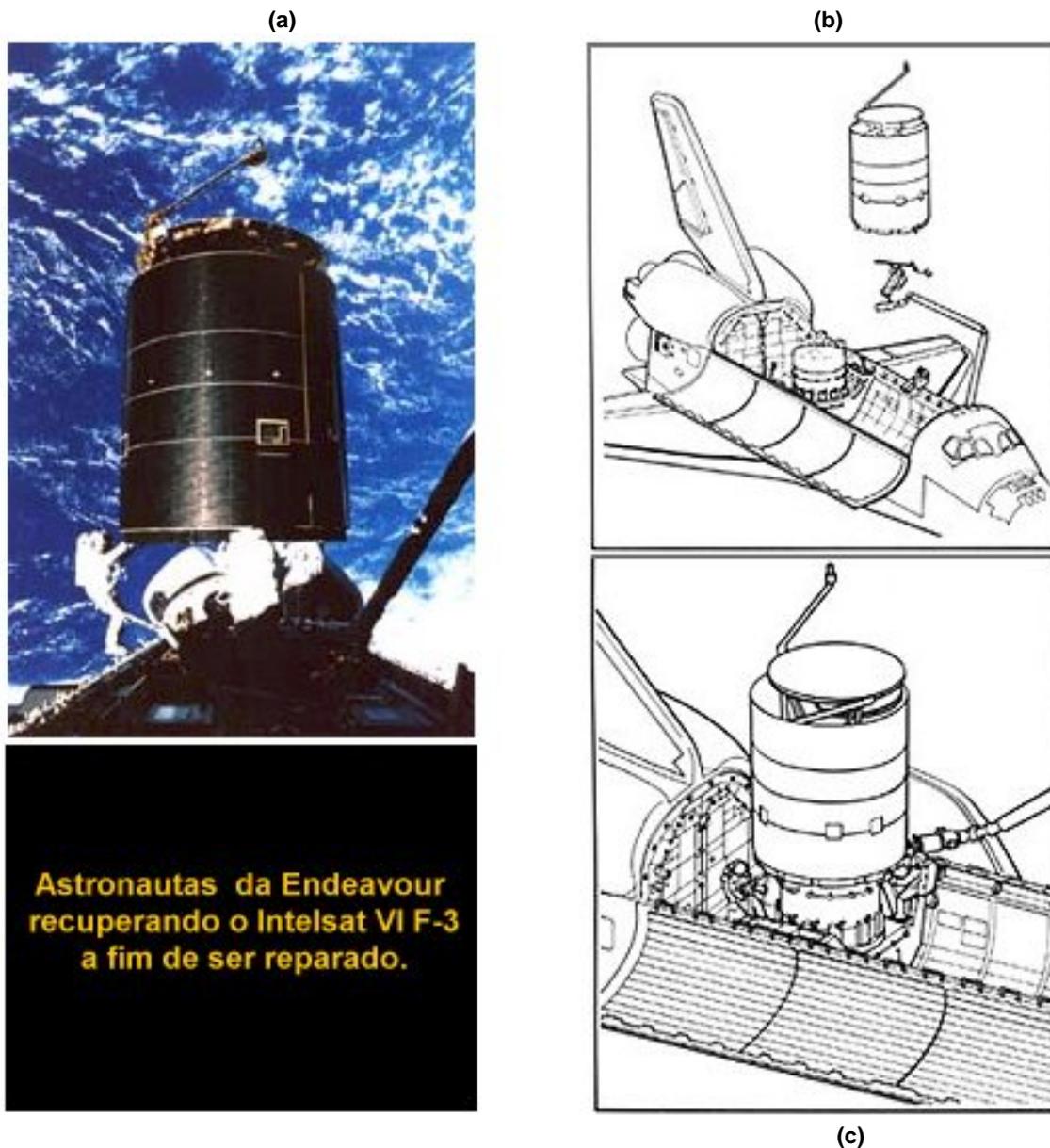


Fig. 4 - a) Astronautas da *Endeavour* recuperando o *Intelsat VI F-3* a fim de ser reparado;

b) Esquema de captura do satélite;

c) Esquema de atracamento do satélite.

FONTE: LIT/INPE

O desenvolvimento de um satélite deve ser empreendido de forma a reduzir ao máximo falhas eventuais durante sua vida útil.

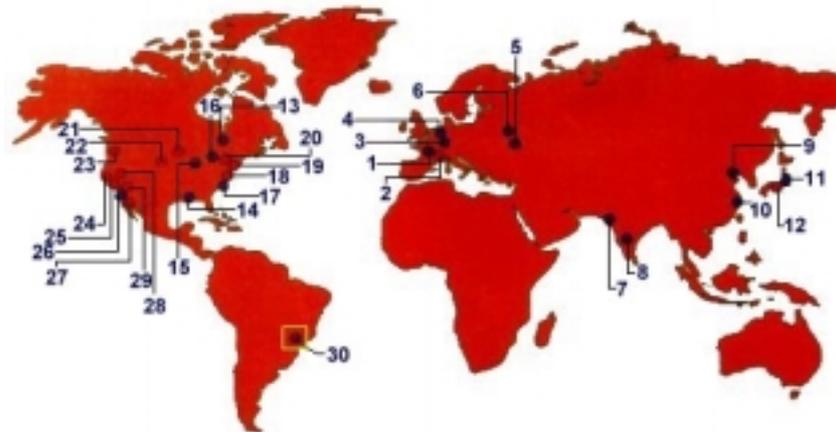
4 ATIVIDADES

O **Laboratório de Integração e Testes (LIT)** foi especialmente projetado e construído com o objetivo de permitir o adequado desenvolvimento de satélites artificiais, no que diz respeito à **montagem, integração e teste**. Por conseguinte, ao sair do **LIT** em direção à base de lançamento, um satélite deve estar garantidamente em condições de suportar os esforços de lançamento e operar por toda sua vida útil prevista. A missão do **Laboratório de Integração e Testes** é a que se segue:

- montagem e integração de satélites.
- qualificação de satélites e seus subsistemas para operação no espaço.
- qualificação e desenvolvimento de produtos de alta tecnologia.
- pesquisa em áreas correlacionadas às atividades fins.
- desenvolvimento de sistemas e subsistemas para atender às necessidades internas do laboratório.
- treinamento e consultorias técnicas em áreas correlacionadas às atividades do laboratório.
- suporte técnico-científico às universidades e empresas públicas e privadas.

5 LABORATÓRIOS MUNDIAIS

São poucos os complexos ao redor do mundo que desempenham missões similares às nossas. A figura abaixo os identifica no *mapa-mundi*. Note que o **LIT** é único no **Hemisfério Sul**.



Legenda

01- INTESPACE (França)	11- TSUKUBA (Japão)	21- MC DONNELL DOUGLAS(USA)
02- AEROSPATIALE (França)	12- NEC (Japão)	22- MARTIN MARIETTA (USA)
03- IABG (Alemanha)	13- DFL (Canadá)	23- BOEING (USA)
04- ESTEC (Holanda)	14- NASA/LOCKHEED (USA)	24- FORD (USA)
05- AIKI (Rússia)	15- AIR FORCE (USA)	25- HUGHES (USA)
06- GLAW KOSMOS (Rússia)	16- NASA/GODDARD (USA)	26- JPL (USA)
07- SPACE APPLIC.CENTER (Índia)	17- NASA/LANGLEY (USA)	27- GENERAL DYNAMICS (USA)
08- ISRO (Índia)	18- GENERAL ELECTRIC (USA)	28- TRW (USA)
09- CAST (China)	19- RCA (USA)	29- ROCKWELL (USA)
10- SHANGAI BUREAU (China)	20- WESTINGHOUSE (USA)	30- LIT / INPE (Brasil)

Fig. 5 - Relação de Laboratórios de Integração e Testes de Satélites existentes no mundo. Em vermelho: Instituições governamentais; em preto: Instituições privadas.

FONTE: LIT/INPE

6 O QUE É MONTAGEM, INTEGRAÇÃO E TESTE DE SATÉLITES?

Dado um satélite artificial, entende-se pelas atividades de montagem, integração e testes a seqüência de eventos e procedimentos logicamente inter-relacionados que têm por propósito alcançar um alto grau de confiança de que o satélite, no momento de lançamento, atenda aos parâmetros de projeto e de desempenho que foram especificados. Doravante a sigla **AIT (Assembly, Integration and Tests)**, internacionalmente consagrada, será utilizada em lugar de montagem, integração e testes.

Em **AIT**, o termo *montagem* está relacionado às operações mecânicas executadas para posicionar, fixar e interligar fisicamente cada subsistema que constitui o satélite;

integração compreende a interligação funcional entre os subsistemas e verificação de interfaces, visando obter um sistema-o **satélite**-que funcione harmoniosamente como um todo, cumprindo os requisitos de projeto; *teste* está relacionado a toda a seqüência de ensaios realizados com o intuito de verificar se os requisitos de projeto foram satisfeitos, se o satélite sobreviverá aos esforços do lançamento, operando adequadamente em órbita e se existem eventuais falhas funcionais.

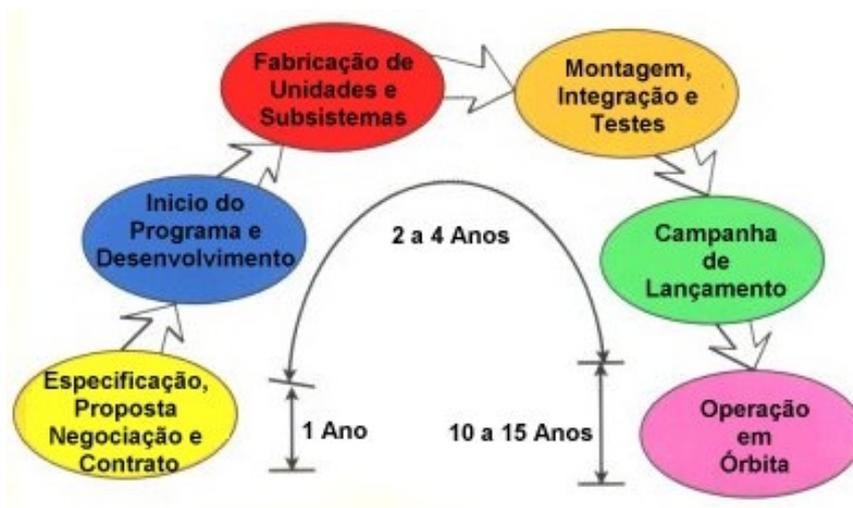


Fig. 6 - Etapas de desenvolvimento de um satélite
 FONTE: LIT/INPE

7 SEQUÊNCIA DE INTEGRAÇÃO

A seqüência de integração adotada pelo LIT aparece descrita no diagrama de fluxo abaixo. As explicações para cada item encontram-se nas seções subseqüentes:

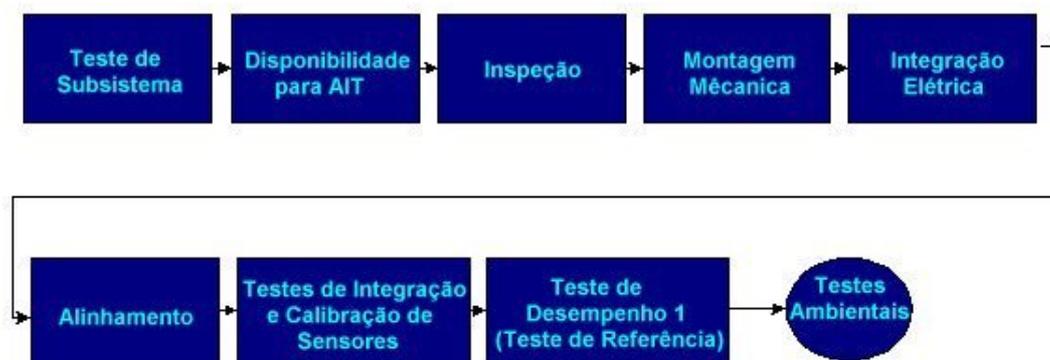


Fig. 7 - Seqüência de integração
 FONTE: LIT/INPE

7.1 TESTE DE SUBSISTEMA

Cada subsistema passa por um conjunto de testes de aceitação, que objetivam cumprir os itens seguintes:

- detectar eventuais falhas;
- caracterizar funcionalmente o desempenho do subsistema;
- verificar se funcionalmente as especificações de projeto estão satisfeitas;
- testar a adequada operação do subsistema em resposta a comandos;
- avaliar se as palavras de verificação do estado funcional do subsistema operam adequadamente.



Fig. 8 - Teste de subsistema
FONTE: LIT/INPE

É importante assinalar que cada subsistema pode ser extremamente complexo e elaborado, suscitando o trabalho de equipes numerosas. Além disso, o desenvolvimento de um subsistema demanda uma elaborada seqüência de ensaios de qualificação, que envolve, entre outros, ensaios de *interferência e compatibilidade eletromagnética (EMI/EMC)*, de *vibração* e de *ciclagem térmica*.

7.2 DISPONIBILIDADE PARA AIT

A disponibilidade de um subsistema para **AIT** significa que o mesmo passou com sucesso pelos teste de qualificação, teve seu desempenho caracterizado e a documentação associada, que descreve a integração do subsistema, está adequada.



Fig. 9 - Modelo estrutural do satélite CBERS sendo inspecionado.
FONTE: LIT/INPE

7.3 INSPEÇÃO

O subsistema passa por um processo detalhado de inspeção, que abrange os aspectos abaixo listados:

- Controle de documentação;
- Inspeção visual;
- Verificação do empacotamento e acabamento superficial;
- Inspeção da cobertura térmica;
- Verificação de dimensões;
- Medição de massa, centro de gravidade e momentos de inércia;
- Aterramento;
- Verificação dos conectores de interligação e dispositivos de fixação.



Fig. 10 - Inspeção dos subsistemas do microsatélite SACI-1
FONTE: LIT/INPE

7.4 MONTAGEM MECÂNICA

As atividades mecânicas objetivam montar os diferentes subsistemas e unidades em

suas respectivas posições no âmbito do satélite. Compreende as atividades abaixo relacionadas:

- Montagem dos dispositivos de fixação;
- Instalação dos cabos de alimentação, de intercomunicação de sinais e de rádio-frequência (RF) e respectivas interfaces;
- Verificação mecânica das interfaces;
- Montagem dos subsistemas e unidades, efetuando os ajustes necessários;
- Alinhamento dos subsistemas em suas respectivas posições.



Fig. 11 - Montagem mecânica do satélite SCD-2
FONTE: LIT/INPE

7.5 INTEGRAÇÃO ELÉTRICA

- Verificação das interfaces elétricas e conectores, através de testes de condutividade, isolamento e de determinação de resistência;
- Verificação dos níveis de tensão nos barramentos e conectores de alimentação;
- Alimentação seqüencial e sucessiva dos subsistemas, com verificação dos níveis de tensão e sinais presentes em suas interfaces e pontos de teste;
- Interligação elétrica das interfaces de conexão entre os diversos subsistemas;
- Alimentação do sistema integrado, com verificação dos níveis de tensão e sinais presentes em todos os pontos de teste.



Fig. 12 - Integração elétrica do satélite SCD-2.
FONTE: LIT/INPE

7.6 ALINHAMENTO

O propósito do alinhamento é o de verificar e, eventualmente, ajustar o posicionamento relativo entre os diversos componentes do satélite, de tal forma a obedecer os limites de tolerância especificados no projeto.



Fig. 13 - Alinhamento do satélite SAC-B
FONTE: LIT/INPE

7.7 TESTES DE INTEGRAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SENSORES

Após a integração elétrica, os diferentes subsistemas são testados. Além disso, os sensores responsáveis por adquirir as informações relativas ao estado funcional do satélite são igualmente testados e calibrados. Esta etapa tem os objetivos abaixo descritos:

- Verificar o funcionamento adequado dos subsistemas;
- Testar a operação conjunta entre os diversos subsistemas, detectando

eventuais falhas de compatibilidade;

- Calibrar os sensores que respondem pela coleta das informações referentes aos parâmetros funcionais e de desempenho do satélite;
- Verificar a resposta do sistema integrado ao envio de comandos;
- Testar a adequada geração, emissão e recepção da telemetria.



Fig. 14 - Teste de integração no satélite SCD-1
FONTE: LIT/INPE

A realização dos testes de integração requer a disponibilidade de um sistema próprio e flexível que possibilite a adequada interface com o satélite e viabilize a execução das complexas operações de ensaios. Este sistema é denominado equipamento elétrico de suporte terrestre-*EGSE (Electrical Ground Support Equipment)*.

7.8 TESTES FUNCIONAIS E DE DESEMPENHO

Os testes funcionais compreendem um conjunto de ensaios que são realizados com o objetivo de verificar se o satélite como um todo está funcionando adequadamente. Consiste em verificar se os parâmetros de caracterização do estado funcional nos diversos modos de operação encontram-se dentro dos limites especificados. Para a realização dos testes funcionais, o satélite é interconectado ao *EGSE* através do conector umbilical e do enlace de *RF*.

O teste de desempenho - *SPT (System Performance Test)* - tem por objetivo avaliar o

desempenho do satélite em seus diversos modos de operação. Compreende a caracterização de parâmetros de desempenho do satélite e subsistemas; verificação dos sensores óticos, aquecedores, termistores e painel solar; inspeção visual.



Fig. 15 – Satélite SCD-1 em configuração de Teste Funcional.
FONTE: LIT/INPE

O **SPT** é repetido várias vezes durante a **AIT** do satélite. Os valores obtidos para os parâmetros de desempenho são armazenados em base de dados apropriada, a fim de permitir acompanhar o histórico de evolução e detectar eventual degradação funcional e indicativo de possibilidade de falha. O **SPT** inicial é denominado Teste de Referência, uma vez que visa obter dados, que serão referência para a comparação com **SPTs** subsequentes.

8 TESTES AMBIENTAIS

O objetivo dos testes ambientais é o de expor o satélite e seus subsistemas às condições ambientais que lhes serão exigidas desde o instante do lançamento até o término de sua vida útil em órbita. A seqüência de ensaios observada para efeito de testes ambientais é a que aparece abaixo.

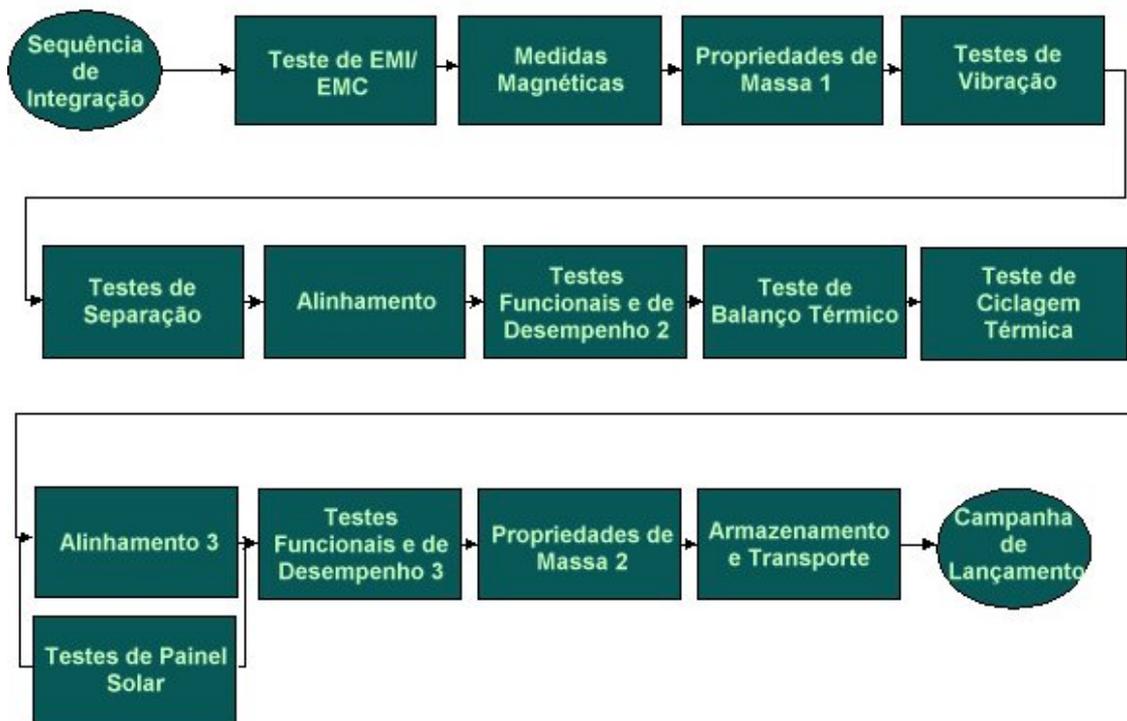


Fig. 16 - Seqüência de Testes Ambientais
 FONTE: LIT/INPE

8.1 TESTES DE EMI/EMC

O teste de *interferência eletromagnética-EMI (Eletromagnetic Interference)*-tem por objetivo verificar o adequado funcionamento do satélite e seus subsistemas quando expostos ao perfil de ondas eletromagnéticas que encontrarão uma vez em operação.

O teste de *compatibilidade eletromagnética-EMC (Eletromagnetic Compatibility)*-tem por objetivo verificar se os subsistemas operam adequadamente quando expostos aos campos eletromagnéticos criados por eles próprios. Eventuais situações em que um subsistema interfira no funcionamento do outro são detectadas através deste ensaio.



Fig. 17 - Teste de EMI-EMC no satélite SAC-B
FONTE: LIT/INPE

8.2 MEDIDAS MAGNÉTICAS

O objetivo desta etapa de teste é o de medir o campo magnético intrínseco gerado pelo satélite e seus subsistemas.

Quando no satélite existem subsistemas destinados a medição de campo magnético-**magnetômetro**-, a determinação do campo magnético intrínseco do satélite configura-se como fundamental para determinar a calibração do magnetômetro e a compensação a ser aplicada a suas medidas.



Fig. 18 – Satélite SCD-2 no interior da Câmara Anecóica.
FONTE: LIT/INPE

8.3 PROPRIEDADES DE MASSA 1

Considerado o satélite como um todo, são determinados sua massa e seus momentos de inércia. Além disso, ele é dinamicamente balanceado.

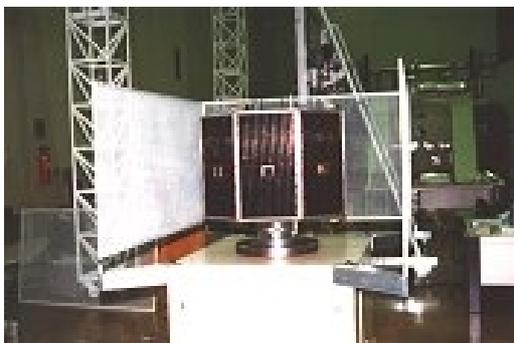


Fig. 19 - Balanceamento dinâmico do satélite SCD-1
FONTE:LIT/INPE

8.4 TESTES DE VIBRAÇÃO

O satélite é exposto aos esforços dinâmicos presentes durante o lançamento.

O objetivo dos ensaios de vibração é o de verificar se a estrutura do satélite e seus subsistemas suportam adequadamente a etapa de lançamento. Além disso, os resultados do modelo estrutural usados no projeto do satélite e seus subsistemas são confrontados com o comportamento real apresentado pela estrutura, propiciando eventuais ajustes.



Fig. 20 - Modelo mecânico do satélite SAC-B em preparação para ensaio de vibração
FONTE: LIT/INPE

Os *testes de vibração* compreendem uma elaborada seqüência de ensaios senoidais e aleatórios de níveis progressivamente crescentes que, além de verificar a resistência da estrutura, possibilitam a determinação das frequências naturais de vibração do sistema acoplado satélite-subsistemas.

8.5 TESTES DE SEPARAÇÃO

Nesta etapa o satélite é exposto aos esforços mecânicos próprios dos instantes de separação entre os módulos do veículo lançador. Neste momento ocorre um cenário caracterizado por um choque mecânico, retratando-se níveis altíssimos de aceleração em intervalos de tempo extremamente reduzidos.

O objetivo do *teste de separação* é o de verificar se o satélite e seus subsistemas suportam tais esforços mecânicos.



Fig. 21 – Satélite SCD-2 sendo preparado para o teste de separação.
FONTE:LIT/INPE

8.6 ALINHAMENTO 2

O mesmo procedimento descrito no item 7.6 é repetido nesta fase. Assim, verifica-se e eventualmente ajusta-se o posicionamento relativo entre os diversos componentes do satélite, de tal forma a obedecer os limites de tolerância especificados no projeto.



Fig. 22 – Satélite SAC-B sendo alinhado
FONTE: LIT/INPE

8.7 TESTES FUNCIONAIS E DE DESEMPENHO 2

Nesta etapa repete-se o teste de desempenho-*SPT (System Performance Test)*-que tem por objetivo aferir o desempenho do satélite em seus diversos modos de operação.



Fig. 23 – Satélite SCD-1 em configuração de Teste Funcional
FONTE: LIT/INPE

8.8 TESTES DE BALANÇO TÉRMICO

Nesta etapa, o satélite é exposto num ambiente de vácuo às irradiações térmicas que encontrará durante sua órbita.

Este ensaio permite refinar o modelo matemático térmico do satélite e verificar o funcionamento do sistema de controle térmico ao manter cada unidade do satélite dentro da faixa de temperatura própria de funcionamento.



Fig. 24 – Satélite SAC-C sendo preparado para Testes Térmicos no Vácuo
FONTE: LIT/INPE

8.9 TESTES DE CICLAGEM TÉRMICA

Nesta etapa, o satélite é exposto, num ambiente de vácuo, aos sucessivos extremos de temperatura que ele deve suportar durante sua operação em órbita.

O objetivo do teste é o de verificar a resistência das unidades a sucessivas variações de temperatura.



Fig. 25 – Satélite SAC-B sendo posicionado na Câmara de Testes Térmicos no Vácuo
FONTE: LIT/INPE

8.10 TESTES DE PAINEL SOLAR

O objetivo deste ensaio é o de verificar o adequado funcionamento do painel solar na geração da potência necessária à operação do satélite.



Fig. 26 - Inspeção de painéis solares
FONTE: LIT/INPE

8.11 ALINHAMENTO 3

Nesta etapa repete-se a operação de alinhamento, conforme descrito no item 7.6.



Fig. 27 – Satélite SAC-B em processo de alinhamento
FONTE: LIT/INPE

8.12 TESTES FUNCIONAIS E DE DESEMPENHO 3

Segue o teste de desempenho-*SPT (System Performance Test)*-que tem por objetivo avaliar o desempenho do satélite em seus diversos modos de operação.



Fig. 28 - Testes funcionais do satélite SCD-2
FONTE: LIT/INPE

8.13 PROPRIEDADES DE MASSA 2

Repete-se as operações descritas no item 8.3, onde são novamente determinados sua massa e seus momentos de inércia. Além disso, ele passa por novo processo de balanceamento dinâmico.



Fig. 29 - Balanceamento dinâmico do satélite SCD-2
FONTE: LIT/INPE

8.14 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE

Após o satélite ter passado com sucesso pela **AIT**, ele é colocado num *container* apropriado e transportado para a base de lançamento, onde tem início a campanha de lançamento.

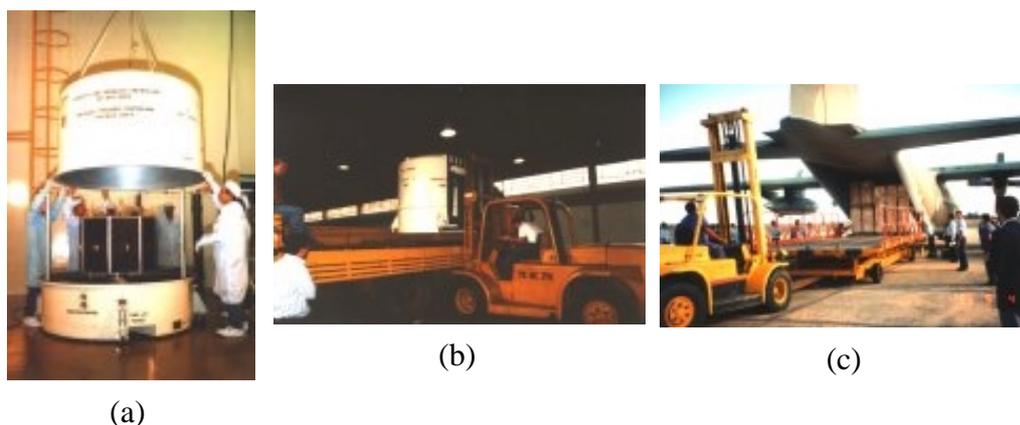


Fig. 30 - a) SCD-2 sendo armazenado no *container* de transporte ;
 b) SCD-2 sendo transportado para o aeroporto;
 c) SCD-2 sendo embarcado para a base de lançamento.

FONTE: LIT/INPE

9 CAMPANHA DE LANÇAMENTO

O *AIT* do satélite prossegue na base de lançamento. Na verdade o *AIT* só termina a poucos segundos do instante do lançamento, quando o satélite passa a operar na configuração de lançamento, a alimentação elétrica passa a ser feita pela bateria interna e o comando do sistema é transferido para o computador de bordo. Até este momento, tem lugar uma seqüência de atividades que aparecem no diagrama de fluxo abaixo.

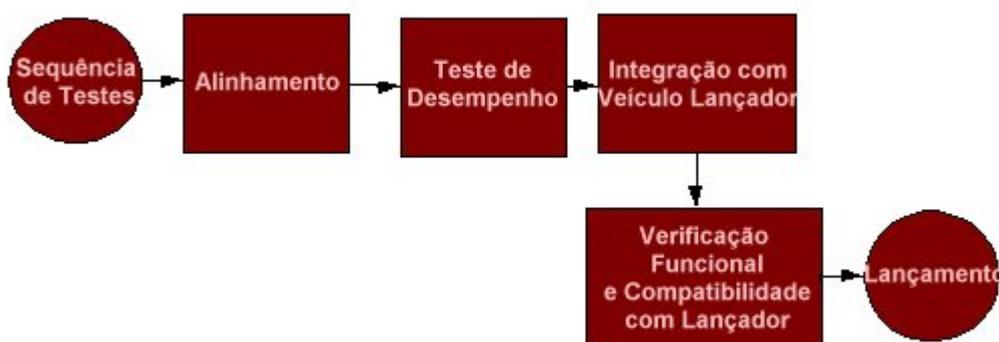


Fig. 31 - Seqüência de testes durante a campanha de lançamento.

FONTE: LIT/INPE

9.1 ALINHAMENTO

Com o transporte até a base de lançamento, algum componente crítico pode ser deslocado de sua posição. Por conseguinte, verifica-se e eventualmente ajusta-se novamente o posicionamento relativo entre os diversos componentes do satélite, de tal

forma a obedecer os limites de tolerância especificados no projeto.



Fig. 32 - Alinhamento do satélite SAC-B
FONTE: LIT/INPE

9.2 TESTES DE DESEMPENHO

Realiza-se o teste de desempenho-*SPT (System Performance Test)*-com o objetivo de ser verificado se a operação de transporte comprometeu, de alguma forma, o funcionamento do satélite.



Fig. 33 - Teste de desempenho sendo executado no satélite SCD-2
FONTE: LIT/INPE

9.3 INTEGRAÇÃO COM VEÍCULO LANÇADOR

O satélite é instalado na coifa do veículo lançador. Segue-se um procedimento delicado que objetiva interconectar o satélite ao veículo lançador através do cabo umbilical. Este cabo transporta sinais e alimentação elétrica, permitindo monitorar e controlar o satélite desde a instalação do lançador na plataforma de lançamento até o instante da separação entre o satélite e o último estágio do foguete.



Fig. 34 - Integração do satélite SCD-2 com o veículo lançador.
FONTE: LIT/INPE

9.4 VERIFICAÇÃO FUNCIONAL E COMPATIBILIDADE COM O LANÇADOR

Executa-se a seqüência de teste funcional e de desempenho, tanto com o objetivo de verificar o adequado funcionamento do satélite e o de coletar os últimos dados de desempenho "**em terra**", como para verificar a perfeita compatibilidade entre o satélite e o veículo lançador, verificando se existe alguma interferência indevida de um sistema sobre o funcionamento do outro.



Fig. 35 - Verificação funcional e teste de compatibilidade entre o satélite SCD-2 e o veículo lançador.
FONTE: LIT/INPE

9.5 LANÇAMENTO

É o momento de maior tensão. O satélite é colocado na configuração de lançamento. A alimentação é externa. As telemetrias são monitoradas e analisadas. Segundos antes do lançamento a alimentação do satélite é transferida para a bateria interna e o comando

passa a ser feito pelo veículo lançador e pelo computador de bordo do satélite. Segue-se a seqüência final de lançamento: 5, 4, 3, 2, 1 ... ouvem-se os motores que impulsionam o veículo lançador em direção ao espaço. As telemetrias continuam a ser monitoradas até o instante em que ocorre a separação entre o satélite e o último estágio do lançador.

Neste momento, encerra-se a *AIT*, que consumiu muito trabalho, esforço e dedicação de uma equipe altamente especializada. Mas a expectativa continua, aguardando o indicativo da estação terrena, com o informe de que as antenas passaram a adquirir a telemetria do satélite e tudo está em ordem!



Fig. 36 – Satélite SCD-2A pronto para ser lançado.
FONTE: LIT/INPE

10 METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO E TESTES DE SATÉLITES

Um satélite é desenvolvido utilizando modelos, com finalidades bem específicas. As atividades de *AIT* são desenvolvidas sobre estes modelos. Muito embora os tipos de modelos utilizados possam variar de satélite para satélite, de um modo geral, empregam-se os modelos abaixo indicados.

10.1 MODELO ESTRUTURAL (*SM - STRUCTURAL MODEL*)

Construído a partir de componentes estritamente necessários para representar os

esforços mecânicos que estão presentes na estrutura do satélite e seus subsistemas. O **SM** é submetido a ensaios de esforço estático e dinâmico (vibração, choque e acústico) que têm por objetivo verificar a adequação do projeto estrutural para suportar a missão a ser cumprida pelo satélite que representa. Estes ensaios também permitem a validação do modelo matemático estrutural do satélite.

10.2 MODELO TÉRMICO (*TM - THERMAL MODEL*)

Construído a partir de componentes estritamente necessários para representar as iterações térmicas presentes no satélite e seus subsistemas. A função do **TM** é a de verificar a adequabilidade do subsistema de controle térmico em desempenhar adequadamente sua função de manter cada unidade dentro da região própria de funcionamento. Além disso, permite a validação do modelo matemático térmico do satélite.

10.3 MODELO DE ENGENHARIA (*EM - ENGINEERING MODEL*)

Este modelo é construído a partir de componentes industriais ou militares, portanto não apropriado para ser submetido aos esforços próprios do lançamento e do ambiente de espaço. A função do **EM** é propiciar a verificação funcional de todos os subsistemas e do satélite integrado, permitindo inclusive a verificação da compatibilidade entre subsistemas e o desenvolvimento das estratégias de montagem e de verificação funcional e de desempenho.

10.4 MODELO DE QUALIFICAÇÃO (*QM - QUALIFICATION MODEL*)

Construído a partir de componentes para aplicações espaciais que suportam os esforços devidos ao lançamento e ao espaço. Todos os subsistemas passam individualmente por testes ambientais de qualificação, assim como o próprio **QM**, depois de totalmente integrado. Os testes ambientais são realizados utilizando níveis de exigência superiores aos que ocorrem no lançamento e em órbita. Quando o **QM** passa com sucesso por todas as etapas de **AIT**, diz-se que ele está qualificado.

10.5 MODELO DE VÔO (*FM - FLIGHT MODEL*)

Este modelo é o próprio satélite a ser lançado e que se espera funcione no mínimo por toda sua vida útil prevista. Cada subsistema passa por testes ambientais, assim como o próprio *FM*, após integrado. Entretanto, os níveis de exigência são exatamente os que ocorrem no lançamento e no espaço. Quando o *FM* passa com sucesso por todas as etapas de *AIT*, diz-se que foi aceito.

11 SISTEMAS ESPECIAIS PARA AIT

O *AIT* requer o emprego de sistemas especiais que possibilitam a adequada interação com o satélite e seus subsistemas. Dentre eles, é importante destacar os abaixo listados:

11.1 EQUIPAMENTO ELÉTRICO PARA SUPORTE TERRESTRE (*EGSE - ELECTRICAL GROUND SUPPORT EQUIPMENT*)

É o sistema que permite interagir com o satélite e seus subsistemas de forma a viabilizar as tarefas abaixo descritas:

- Recebimento, decodificação e interpretação das telemetrias;
- Envio de comandos;
- Realização de seqüências automáticas de teste;
- Análise funcional e de desempenho do satélite e seus subsistemas;
- Fornecimento de alimentação elétrica;
- Armazenamento do histórico de evolução dos padrões de desempenho do satélite e subsistemas;
- Simulação do painel solar.

O *EGSE* é subdividido em subsistemas, segundo a classificação abaixo:

11.1.1 EQUIPAMENTO DE VERIFICAÇÃO GLOBAL (*OCOE - OVERALL CHECKOUT EQUIPMENT*)

É o subsistema central do **EGSE**, que recebe, decodifica e analisa telemetrias, envia comandos, e permite a implementação de seqüências automáticas de teste. A operação funcional do satélite e subsistemas é feito através do **OCOE**, sendo sua utilização geral, independente das particularidades de satélites diferentes.

11.1.2 EQUIPAMENTO DE VERIFICAÇÃO ESPECÍFICA (*SCOE - SPECIAL CHECKOUT EQUIPMENT*)

São subsistemas que operam em conjunto com o **OCOE**, voltados para a interação com subsistemas específicos do satélite. Em geral, são particulares a cada tipo de satélite.

11.2 EQUIPAMENTOS MECÂNICOS PARA SUPORTE TERRESTRE (*MGSE - MECHANICAL GROUND SUPPORT EQUIPMENT*)

São equipamentos mecânicos que permitem a manipulação, a integração mecânica, o transporte e o armazenamento do satélite.

12 OUTRAS ATIVIDADES DO LIT

Além de conduzir a atividade para a qual foi projetado e construído, que é a montagem, integração e teste de satélites, o LIT, em função de sua capacitação e infra-estrutura instalada, tem desenvolvido trabalhos conjuntos com mais de 500 parceiros das mais diversas áreas, das quais podemos considerar como sendo de maior relevância as seguintes:

- **Aeroespacial;**
- **Informática e Automação;**
- **Telecomunicações;**
- **Automotiva;**
- **Química e Farmacêutica;**

- **Instrumentação.**

Estes trabalhos envolvem as seguintes áreas:

12.1 QUALIFICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS DE ALTA TECNOLOGIA

- Ensaio de Interferência e Compatibilidade Eletromagnética;
- Qualificação de Componentes Eletrônicos;
- Calibração de Instrumentos Eletrônicos;
- Calibração de Sensores;
- Metrologia Mecânica;
- Análise e Controle de Contaminação;
- Manutenção de Instrumentos Eletrônicos e Sistemas Computacionais;
- Medidas de Antenas;
- Ensaio Dinâmico;
- Ensaio Vácuo-Térmico;
- Medidas de Propriedades de Massa.



Fig. 37 - Áreas de atuação do LIT
 FONTE: LIT/INPE

12.2 TREINAMENTO EM ÁREAS ESPECÍFICAS

- EMI/EMC - Interferência Eletromagnética / Compatibilidade Eletromagnética
- Calibração de instrumentos eletrônicos
- Confiabilidade de componentes eletrônicos
- Análise de falhas em componentes eletrônicos
- Modelagem e simulação computacional
- Processamento digital de sinais
- Sistemas dinâmicos e não-lineares
- Automação de testes funcionais

12.3 DESENVOLVIMENTO

- Ampliadores de carga
- Condicionadores para "*strain gauges*"
- Sistemas automáticos para testes elétricos e funcionais

- Dispositivos especiais para testes mecânicos
- Técnicas para medidas específicas
- Procedimentos de qualificação específicos

12.4 PESQUISA

- Sistemas dinâmicos e não-lineares
- Sistemas computacionais para "tempo real"
- Sistemas computacionais distribuídos
- Medições elétricas
- Modelagem e simulação computacional
- Processamento digital de sinais
- Técnicas de controle para ensaios de vibração e térmicos no vácuo

13 CONCLUSÃO

Obrigado pelo seu interesse em relação ao *Laboratório de Integração e Testes - LIT* e as atividades que aqui são empreendidas. Você pode obter maiores detalhes acerca de AIT, de tecnologia usada no desenvolvimento de satélites e de programas atuais de desenvolvimento de satélites consultando nossa página na Internet, através do endereço www.lit.inpe.br. Além disso, nossa página é atualizada com frequência, de forma a possibilitar o acompanhamento das atividades correntes de AIT no LIT.