

TESTES AMBIENTAIS E VERIFICAÇÃO DE REQUISITOS EM PROJETOS DA ÁREA ESPACIAL

Hadler Egydio da Silva

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
S J Campos – SP, Brasil
hadler@dss.inpe.br

Leonel Fernando Perondi

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
S J Campos – SP, Brasil.
perondi@las.inpe.br

Resumo: *Este artigo tem como objetivos: a) introduzir os conceitos de verificação e métodos de verificação e descrever os principais métodos de verificação empregados em programas da área espacial, conforme o Padrão ECSS, e b) apresentar e descrever os principais testes ambientais implementados em programas espaciais, bem como discutir a sua importância para as atividades de verificação, para, então, comparar brevemente os testes ambientais adotados pelo INPE com aqueles recomendados pelo padrão ECSS.*

Palavras-chave: *testes ambientais, verificação, requisitos, projeto espacial*

1. INTRODUÇÃO

Tempo, custo e qualidade são, normalmente, tratados como as principais variáveis a serem otimizadas em projetos. O fator qualidade engloba não só o grau de aderência do produto final aos requisitos de projeto, mas também a capacidade de atendimento aos requisitos dos “*stakeholders*”.

O ciclo de vida de projetos na área espacial está organizado em fases sequenciais, separadas por reuniões formais de revisão, que aprovam ou não a passagem do projeto para a fase seguinte, tendo como objetivo principal maximizar a confiabilidade do produto final. Com este intuito, é desenvolvida uma sequência de modelos até que se chegue a um produto final que atenda todas as especificações requeridas. Projetos usuais contemplam os seguintes modelos: Modelo de Engenharia (EM), Modelo de Qualificação (QM) e o Modelo de Voo (FM). A filosofia de modelos em projetos na área espacial objetiva garantir que o projeto final atenda todos os requisitos especificados, e que, sobretudo, o Modelo de Voo esteja livre de defeitos, sem que haja a necessidade de que passe por testes tão rigorosos quanto os de qualificação.

O Modelo de Engenharia é fabricado a partir de partes e materiais funcionalmente equivalentes àqueles qualificados para aplicação espacial. Este modelo é utilizado para a qualificação funcional do projeto do produto, exceto no que tange às verificações de redundância, demonstração de tolerância a falhas e checagem da “*deriva*” de parâmetros (ECSS,1998). O Modelo de Engenharia é também utilizado para a validação final de facilidades de teste e do “*Ground Support Equipment – GSE*”, bem como de processos correlatos.

O Modelo de Qualificação, por sua vez, é fabricado conforme o projeto funcional qualificado através do Modelo de Engenharia (EM), porém exclusivamente com partes e materiais com qualificação espacial. Em princípio, o Modelo Voo possui a mesma configuração que o Modelo de Qualificação, salvo “*waivers*” ou desvios que, eventualmente, se fizeram necessários durante a sua fabricação. A utilização desta filosofia de desenvolvimento de projetos na área espacial, baseada em modelos, possibilita a qualificação por similaridade do produto final.

Os modelos de qualificação e voo são produzidos com processos idênticos, o que, em princípio, garantiria, por similaridade, que o Modelo de Voo suportaria todas as condições ambientais às quais foi submetido o Modelo de Qualificação. Como, porém, na prática, sempre existirão diferenças entre modelos fabricados independentemente, o Modelo de Voo é, também, submetido a testes funcionais e ambientais, mas em níveis inferiores de exigência (testes ambientais em nível de aceitação).

Concluindo, de forma sintética, temos que:

- o Modelo de Engenharia deve ser completo e representativo quanto à funcionalidade e desempenho;
- o Modelo de Qualificação deve ser completo e representativo do Modelo de Voo, de modo a demonstrar que o projeto e a fabricação atendem, com suficiente margem, todas as especificações para as condições ambientais previstas para a missão;
- o Modelo de Voo deve ser fabricado utilizando exatamente os mesmos processos, ferramental e sequência de operações utilizados na fabricação do Modelo de Qualificação, congelados após a Revisão de Qualificação.

De modo a se atingir alta confiabilidade em projetos espaciais, é essencial que a verificação dos requisitos seja realizada da forma mais completa e apropriada possível. A verificação deve se dar em cada fase do projeto e nível de exigência, baseada tanto nos requisitos do programa quanto na “*baseline*¹” aprovada na revisão de projeto anterior.

As verificações são efetuadas ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento de um produto espacial, e seguem um ou mais dos seguintes métodos, ordenados conforme a confiabilidade dos resultados: *teste, análise, revisão de projeto e inspeção*.

¹ O termo *baseline* representa o conjunto de documentos aprovados em uma determinada revisão de projeto. Tal conjunto de documentos sofre congelamento de status e constitui a base para fabricação, teste e verificação de cada modelo subsequente a esta revisão (ECSS, 2004).

O ciclo de vida representado na Figura 1 destaca o posicionamento da verificação pelo método *teste*, nas diversas fases e revisões de um projeto espacial.

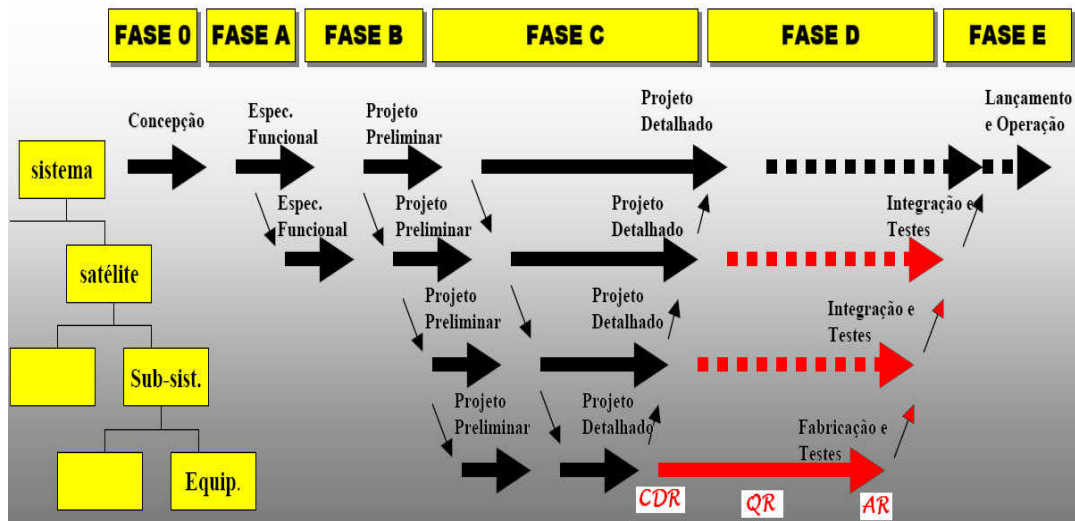


Figura 1 : Ciclo de vida x Ciclo de verificação por teste (SOUZA, 2008)

Entre as revisões de projeto destacadas na Figura 1, CDR (*Revisão Crítica de Projeto*), QR (*Revisão de Qualificação*) e AR (*Revisão de Aceitação*), ocorrerão as seguintes atividades:

- início da fabricação do *modelo de qualificação* (MQ);
- testes funcionais e ambientais do MQ em nível de qualificação;
- início da fabricação do *modelo de voo* (MV);
- testes funcionais e ambientais no MV em nível de aceitação.

Os testes executados tanto em *Nível de Qualificação* (NQ) quanto em *Nível de Aceitação* (NA) representam uma condição de esforço imposta ao “objeto de teste” mais agressiva que a maior condição prevista ao longo da vida útil do Modelo de Voo do “objeto de teste”. Tanto o nível de aceitação quanto o nível de qualificação ao qual será submetido um equipamento, em determinado teste, serão determinados via simulação e análise, considerando a condição operacional prevista acrescida de um fator de segurança apropriado. (ECSS, 2009d)

Do exposto acima, observa-se a grande importância que as atividades de *verificação* têm no desenvolvimento e fabricação de equipamentos e sistemas para operação no espaço exterior. O objetivo geral das atividades de verificação pode ser definido como: *demonstrar, através de processos dedicados, que o modelo de voo do produto atende os requisitos especificados* (ECSS, 2009c).

Entre os métodos de verificação, os *testes ambientais* têm posição especial, pois é através deles que se demonstra que o *design* e o equipamento produzido atendem requisitos fundamentais, tais como aqueles advindos das acelerações e vibrações que acompanham o lançamento, ou do fadigamento térmico que acompanha a operação em órbitas baixas, em condições de vácuo.

Este artigo objetiva apresentar os conceitos de *verificação* e *métodos de verificação*, e descrever os *testes ambientais* e a sua importância para as atividades de verificação em projetos da área espacial. Serão apresentados os requisitos de verificação segundo os padrões ECSS-E-10-03A, “*Space engineering – Testing*” e ECSS-E-10-02A “*Space Engineering – Verification*”, para, então, comparar brevemente os requisitos de testes ambientais adotados pelo INPE, em um de seus projetos, com aqueles recomendados pelo referido padrão.

O artigo está organizado na seguinte forma: Na Seção 2, são introduzidos os conceitos de *verificação* e *método de verificação*, e descritos, brevemente, cada um dos métodos de verificação empregados em programas da área espacial. Na Seção 3, são apresentados e descritos, com algum detalhe, os diferentes testes ambientais implementados em programas espaciais. A Seção 4 é

dedicada a uma discussão sobre a importância dos testes ambientais para as atividades de verificação em programas da área espacial, enquanto que a Seção 5 busca comparar brevemente os requisitos de testes ambientais adotados pelo INPE com aqueles preconizados pelo padrão ECSS. Finalmente, a Seção 6 apresenta as conclusões.

2. VERIFICAÇÃO

Verificação é a comprovação, através do fornecimento de evidência objetiva, de que requisitos especificados foram atendidos (ABNT,2005). As perguntas que devem ser respondidas para que haja o estabelecimento de uma matriz de verificação são, essencialmente, as seguintes: “O quê?” “Como?” e “Quando?”. Segundo o padrão ECSS-E-ST-10-02C, “*Space engineering – Verification*” (ECSS, 2009a), na implementação do processo de verificação, o fornecedor passará pelas seguintes etapas:

- identificar "*O quê*", ou seja, o objeto de verificação e os requisitos a serem verificados;
- identificar "*Como*", ou seja, o método utilizado para verificar os requisitos, considerando os métodos estabelecidos na especificação técnica;
- identificar "*Quando*", ou seja, quando, no ciclo de vida do projeto, implementar processo de verificação, aplicando a estratégia escolhida.

Os objetivos de um processo de verificação devem ser claramente definidos, segundo o padrão ECSS-E-ST-10-02C, são estes (ECSS, 2009c):

- demonstrar a qualificação do "*design*"² e do desempenho do produto, através da satisfação de requisitos em níveis especificados;
- garantir que o produto esteja em acordo com o "*design*" qualificado e que esteja livre de defeitos de fabricação e aceitável para uso;
- confirmar a integridade e desempenho do produto em marcos definidos do ciclo de vida do produto (e.g. lançamento, *comissionamento*³, e outros);
- confirmar que o sistema como um todo (incluindo ferramentas, procedimentos e recursos) é capaz de atender os requisitos de missão.

O processo de verificação se dá ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, desde o estabelecimento do planejamento das atividades de verificação até a escolha adequada dos métodos, etapas e níveis requeridos, durante o desenvolvimento de cada modelo do projeto. A seleção de métodos, níveis e etapas de verificação depende das características do projeto e das exigências associadas.

2.1 Seleção do método de Verificação

Após a identificação do requisito a ser verificado, dos potenciais métodos de verificação e das alternativas para cada caso particular, devem ser consideradas as técnicas de ensaio e as ferramentas analíticas disponíveis. As técnicas de ensaio devem, então, ser avaliadas quanto à sua viabilidade, em função das diretivas indicadas a seguir:

- avaliar se o método é tecnicamente viável;
- avaliar se as instalações estão disponíveis;
- avaliar se o nível de confiança pode ser obtido com razoável fidelidade;
- avaliar precisão e validade;
- avaliar se os riscos para pessoal, equipamento de voo e instalações são aceitáveis;
- avaliar se o impacto sobre o cronograma é aceitável.

² Neste artigo, sempre que conveniente, será utilizada a palavra *design* com o significado de *projeto técnico*.

³ *Comissionamento* refere-se à verificação e validação de atividades realizadas após o lançamento e antes da entrada em serviço operacional.

2.2 Métodos de Verificação

O cumprimento dos requisitos deve ser provado através de um ou mais dos seguintes métodos de verificação (ECSS,2009b):

- Análise;
- Teste;
- Inspeção;
- Demonstração.

2.2.1 Análise

A verificação por análise consiste na realização de avaliações empíricas ou teóricas, através de técnicas acordadas com o cliente. Tais técnicas incluem análises de projeto sistemáticas, estatísticas ou qualitativas, modelamentos e simulação computacional. A *verificação por similaridade* constitui-se em uma variante da *verificação por análise*, que objetiva evidenciar que um produto já qualificado (MQ) pode ser replicado “identicamente” em modelos de voo.

2.2.2 Teste

A verificação por teste é um método em que o desempenho e as funções de um produto são avaliados quantitativamente em um ambiente simulado, representativo da situação real em que o equipamento operará. A análise dos dados gerados em testes é considerada como parte integrante do próprio teste, e proporciona uma comparação entre o desempenho medido e o estabelecido via requisitos. O ensaio deve ser selecionado como método primário, sempre que técnicas analíticas não produzirem resultados adequados.

A análise de dados derivados de teste é uma parte integrante do programa de teste e não deve ser confundida com análise, tal como definida anteriormente. Os ensaios são utilizados para demonstrar objetivamente o cumprimento dos requisitos, uma vez que produzem resultados quantitativos. Há duas categorias de testes que ocorrem alternadamente em uma programação de testes, são eles os testes ambientais e os testes funcionais. Os testes ambientais são simulações das várias restrições a que um item é submetido durante seu ciclo de vida operacional, sejam elas induzidas ou naturais (ECSS, 2002a).

2.2.3 Inspeção

Inspeção é um método de verificação que determina a conformidade com requisitos, que são explicitamente visíveis no equipamento ou em sua documentação. A inspeção utiliza métodos padrão para verificar o cumprimento de requisitos funcionais de construção e conformidade entre documentação e “*specimen*”⁴. A ênfase da inspeção está na observação das características físicas, e não em seu desempenho. Nas inspeções serão avaliadas características como dimensões, limpeza, rugosidade, funcionamento dos mecanismos, alinhamentos, entre outras.

2.2.4 Demonstração

Demonstração consiste na determinação qualitativa de propriedades de um item final ou componente. A determinação qualitativa é feita por meio da observação, com ou sem equipamento ou aparelho de teste especial, que verifica características tais como “*workmanship*”, serviços, transportabilidade e acesso a recursos.

3. TESTES AMBIENTAIS

Dentro da filosofia do programa espacial, não há espaços para incertezas ou baixa confiabilidade operacional. É preciso simular todas as condições que o satélite irá enfrentar, desde o seu lançamento até o final de sua vida útil no espaço, e esta análise só pode ser realizada por meio dos testes ambientais. Os testes ambientais objetivam verificar as características comportamentais

⁴ O termo *specimen* está sendo utilizado como sinônimo de objeto de teste.

do objeto testado em condições ambientais de severidade semelhante ou superiores a que o objeto de teste, sistema ou subsistema, passará durante sua vida útil. Resumidamente, procuram simular as condições reais do ambiente de operação do objeto testado. Entre os testes ambientais destacam-se os seguintes: *termo-vácuo*, *ciclagem térmica*, *choque térmico*, *vibração senoidal*, *vibração randômica*, *teste acústico* e *choque mecânico*.

Existe uma vasta gama de testes a que o “*hardware*” de um satélite, seus subsistemas e equipamentos devem ser submetidos. Alguns testes não são considerados como ambientais. Exemplos incluem: *testes estáticos*, *testes de balanceamento dinâmico*, *testes de propriedades de massa* e *testes de alinhamento*. Estes testes são, também, considerados como de vital importância para a verificação do cumprimento de requisitos de missão. Podem, inclusive, colaborar para a sistemática de aprovação de testes ambientais, fazendo parte do processo de verificação destes testes. Todavia, são testes classificáveis mais adequadamente como *testes de levantamento de propriedades físicas*. Um exemplo são os testes de alinhamento executados antes e após os ensaios de vibração, cujos resultados fazem parte do critério de aprovação do teste de vibração. Testes de abertura de apêndices (antenas, painéis solares, mastros com instrumentos) podem ser classificados como ambientais quando realizados no âmbito do sistema satélite, uma vez que nesta condição experimentam choques mecânicos e outros efeitos existentes em seu ambiente real de operação. Porém, quando realizados no âmbito de subsistemas e equipamentos são melhor classificados como testes funcionais.

A seguir, é apresentada uma breve descrição dos principais testes ambientais.

3.1 Termo-Vácuo

O objetivo do teste de termo-vácuo é o de demonstrar a habilidade do equipamento sob teste de operar em um ambiente de vácuo, a diferentes temperaturas, que simula a pior condição em órbita, incluindo uma margem adequada.

Durante o processo de qualificação espacial, câmaras de testes termo-vácuo são utilizadas para simular as condições ambientais esperadas após o lançamento. Ainda que o número de ciclos (calor e frio) a que seja submetido o objeto de teste seja apenas representativo daquele experimentado em sua vida útil, os testes de termo-vácuo podem fornecer uma boa estimativa de seu comportamento futuro, uma vez que são executados em situações de pior caso (maior e menor temperaturas previstas durante sua vida útil)

Um sistema de teste termo-vácuo consiste de uma câmara, um conjunto de tubos utilizado para transmitir calor e frio por radiação e alguns dispositivos auxiliares (ARAUJO, 2008). Durante seu funcionamento, primeiro o vácuo é estabelecido no interior da câmara para simular a condição ambiental a que os sistemas espaciais estão expostos. Em seguida, a temperatura interna dos tubos é modificada para simular os ciclos térmicos causados pela incidência e ausência de luz solar. Para resfriar a câmara, nitrogênio líquido é pulverizado e transformado em gás no interior do conjunto de tubos. Para aquecer, resistências montadas no interior do conjunto de tubos fornecem calor ao gás que, por radiação, aquecem o “*specimen*”.

3.2 Ciclagem Térmica

O objetivo do teste de ciclagem térmica é o de demonstrar que o equipamento sob teste atende a todos os requisitos, funcionais e de desempenho, à pressão ambiente, para todas as temperaturas na faixa do teste.

Neste teste, o objeto de teste é submetido a ciclos de calor e frio. Este teste pode ser realizado na presença de atmosfera ou, se conveniente, pode ser realizado em condições de vácuo combinado com o teste de termo-vácuo, desde que os limites de temperatura, número de ciclos, taxa de mudança de temperatura e tempo de espera sejam compatíveis.

3.3 Choque Térmico

Ensaio que visa demonstrar a capacidade dos materiais de resistir, sem que haja dano físico ou deterioração no desempenho, a *variações repentinas*⁵ da temperatura da atmosfera circundante. É aplicável a peças e equipamentos diretamente expostos, como: células solares, antenas, acessórios externos, revestimentos térmicos, entre outros.

Testes de choque térmico possuem um custo relativamente inferior aos demais testes térmicos e propiciam a detecção de falhas prematuras em materiais, processos de fabricação e “*workmanship*”. Quando empregados em antecedência a outros testes térmicos, podem, eventualmente, diminuir consideravelmente o custo total dos testes, uma vez que podem evitar a aplicação prematura de testes de termo-vácuo aos “*specimens*” que sejam reprovados no teste de choque térmico.

3.4 Vibração Senoidal

O objetivo do *teste de vibração senoidal* é o de demonstrar a capacidade do equipamento de suportar as excitações de baixa frequência causadas pelo lançador, aumentadas em amplitude por um fator de qualificação.

Neste ensaio, o “*specimen*” é submetido a uma excitação periódica externa, de frequência variável e amplitude conhecida. A resposta de aceleração do “*specimen*” para todas as frequências é, então, registrada, através da medida da aceleração via acelerômetros fixados em diferentes locais do “*specimen*”. Além da detecção das frequências naturais do “*specimen*”, é possível, também, determinar se houve alguma degradação estrutural durante o teste por meio da comparação das assinaturas de resposta em frequência, colhidas antes e após o ensaio. O teste de vibração senoidal serve, também, para verificar e realimentar os modelos matemáticos de simulação e previsão de comportamento.

3.5 Vibração Randômica (ou Aleatória)

A finalidade dos testes de vibração aleatória é demonstrar a capacidade dos equipamentos de suportar a excitação aleatória e excitação de ruído acústico transmitidas pelo lançador, acrescida de uma margem de qualificação (ECSS,2002b).

3.5 Acústico

A finalidade dos testes acústicos é demonstrar que o “*specimen*” pode suportar vibração acusticamente induzida pelo ambiente durante o lançamento. Ensaio acústico são realizados em câmaras acústicas reverberantes, com o item de teste na configuração de lançamento, e montado sobre um dispositivo de ensaio que simula dinamicamente as condições de montagem de vôo (ECSS, 2002c).

3.6 Choque mecânico

Seu principal objetivo é simular os choques mecânicos que se propagam ao longo do “*hardware*”.

Ondas de choque ocorrem durante os estágios de separação do foguete, e no instante da explosão dos pirotécnicos, tanto do cinto de separação quanto de abertura dos painéis.

Podem ser induzidas artificialmente, para efeito de teste, por meio de *shakers* ou martelos (*hammers*), ou ainda, quando em nível de sistema, reproduzindo algum estágio de separação em laboratório, por meio de explosão de pirotécnicos. Choques mecânicos reproduzem mais fielmente os estágios de separação e abertura de painéis quando se utilizam mecanismos como os martelos (*hammers*) para produzi-los, pois assim se obtém mais facilmente excitações de alta frequência com altas acelerações.

⁵ Para efeitos do presente documento, “mudanças repentinas” é definido como “uma mudança de temperatura superior a 10 ° C (18 ° F) no intervalo de um minuto.”

4. IMPORTÂNCIA DOS TESTES AMBIENTAIS PARA AS ATIVIDADES DE VERIFICAÇÃO.

O padrão ECSS-E-10-03A define teste ambiental como sendo *a simulação das várias restrições (juntas ou separadas) às quais um item está sujeito durante o seu ciclo de vida operacional*. Os testes ambientais podem simular tanto o ambiente natural, como aquele relativo à operação em órbita, quanto induzidos, por exemplo, durante as fases de lançamento e injeção em órbita.

Um programa de teste é definido em conformidade com a abordagem de verificação e a filosofia de modelos selecionadas. Deve ser definida a estratégia de verificação para as diferentes categorias de exigências. O programa de teste deve, além do mais, ser coordenado com o fluxo de integração, otimizando os testes e as atividades de integração (INPE, 2005).

Para que haja uma definição do programa de testes, as seguintes diretivas são normalmente observadas:

- os pontos críticos e as interfaces devem ser testados no início do programa;
- o fluxo de ensaios deve minimizar a reincidência de testes;
- a viabilidade dos testes deve ser confirmada no início do programa;
- o programa de teste global deve cobrir os diferentes níveis de verificação, abrangendo a qualificação e a aceitação, e, conforme a necessidade, contemplar também, testes de pré-lançamento e testes em órbita.

As solicitações impostas aos satélites ocorrem desde o momento de seu lançamento até o fim de sua vida útil, sendo que durante o lançamento as solicitações são prioritariamente mecânicas, enquanto que, após, em órbita, as solicitações são prioritariamente térmicas.

A seguir são listadas as solicitações mecânicas e térmicas impostas pelo lançador (SOUZA, 2009):

- aceleração,
- vibração aleatória e senoidal,
- choques (separação de estágios e da cinta),
- “*spin*”,
- ambiente acústico,
- despressurização,
- cargas térmicas internas à coifa (solo + voo),
- aquecimento aerodinâmico (após a ejeção da coifa),
- “*Jet plumbing*” de motores ou propulsores.

De modo a testar os requisitos de sistema e de subsistema, devem ser realizados diversos testes, não só no satélite inteiramente integrado, mas também em cada um dos equipamentos que o compõem, sempre que existirem requisitos quantitativos a serem verificados.

Para cada teste ambiental, existe uma sequência de testes funcionais que devem ser aplicados antes e depois dos testes ambientais, de modo que seja possível detectar qualquer degradação ou anomalia que tenha ocorrido durante o ensaio principal.

De modo a simular as condições encontradas pelo veículo espacial e seus equipamentos durante sua vida operacional, ou em algum ponto dela, é necessária uma ampla infra-estrutura em solo que permita a realização de todos os testes ambientais previstos. Tal infra-estrutura é normalmente composta de câmaras de termo-vácuo e câmaras de vibração acústica de grande volume que permitam, por exemplo, testar plataformas orbitais inteiras, vibradores (“*shakers*”) de diferentes características e tamanhos, para os testes de vibração senoidal e *randômica*, e outras facilidades e dispositivos que permitam simulações variadas, tais como a de abertura de painéis solares, ou o “*deployment*” de estruturas retráteis, como antenas especiais e outras. A infra-estrutura de testes ambientais, juntamente com aquela relacionada à integração do veículo espacial, encontra-se, normalmente, entre os itens de maior investimento no estabelecimento de um programa espacial.

5. ATIVIDADES DE TESTE IMPLEMENTADAS PELO INPE VERSUS REFERÊNCIA DA ESA

Nesta seção, a filosofia de testes utilizada no desenvolvimento e fabricação dos satélites CBERS 3 & 4 é apresentada e comparada com o padrão ECSS. Na Tabela 1, a seguir, são apresentados os testes funcionais e ambientais, adotados pelo INPE, programados para cada classe de equipamentos, sendo que alguns são mandatórios e outros opcionais (INPE,2008).

Tabela 1 - Sumário dos testes ambientais por classe de equipamentos (INPE, 2008).

Classe do equipamento	Eletrônico	SAG	Bateria	Antena	Microondas	Ótico	Térmico	Disp. Mce. c/ movimento	Trustes	Válvulas	Vaso de Pressão	Fluido de Propulsão
TESTE												
Vácuo- térmico	QA	Q a	QA	Q a	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA
Ciclagem térmica (4)	QA	q a	QA	q a	q a	q a	q a	Q a	q a	q a	q a	q a
Choque Térmico (1)	--	Q -	--	Q -	--	Q -	Q -	q -	--	--	--	--
Vibração senoidal	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -
Vibração randômica	QA	--	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA
Acústico	--	QA	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Choque Mecânico	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -
Aceleração	Q -	--	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -
Pressão	--	--	--	--	--	--	--	--	q a	QA	QA	QA
Vazamento	--	--	- A	--	--	--	--	--	q a	QA	QA	QA
Radiação UV (1)	--	Q -	--	--	--	Q -	Q -	--	--	--	--	--
Radiação partícula (1)	Q -	Q -	--	--	--	Q -	Q -	--	--	--	--	--
Descarga elétrica (2)	QA	--	--	Q -	Q -	--	--	--	--	--	--	--
Soldagem a frio (3)	--	Q -	--	--	--	--	--	Q -	--	--	--	--

Legenda:
 Q → Nível de qualificação (mandatório),
 A → Nível de aceitação (mandatório)
 q → Nível de qualificação (opcional)
 a → Nível de aceitação (opcional)

Notas:
 (1)- Opcionais para equipamentos que usam componentes qualificados ou para equipamentos com dispositivos anti-radiação se o range do dispositivo anti-radiação é maior que o requerido.
 (2)- Somente para equipamentos que devem ser ligados durante o lançamento.
 (3)- Os ensaios são encadeados de forma a otimizar a execução das operações, minimizar os riscos impingidos ao satélite, aumentar a garantia de que o satélite foi montado e integrado corretamente, e certificar que todo o satélite está funcionando tal como especificado.
 (4)- Pode ser realizada em conjunto com os testes Vácuo- térmico.

Na Tabela 2, é apresentada uma comparação entre os principais testes ambientais e funcionais aplicados a equipamentos, listados na Tabela 1, com o estabelecido no padrão ECSS-E-10-03A (2002d,2002e).

Tabela 2 – Comparação entre principais testes realizados pelo INPE e ESA
(INPE,2008)(ECSS,2002d)(ECSS,2002e)

TESTE	Categoria / tipo de equipamento												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
Propriedades Físicas	ESA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA
	INPE	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA
Vibração Randômica	ESA	QA	Q ¹ A ³	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	--
	INPE	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	--
Vibração Senoidal	ESA	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	--
	INPE	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-
Choque Mecânico	ESA	Q ² a	q-	q-	q-	q-	--	q-	q-	qa	--	--	q-
	INPE	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-	Q-
Teste Acústico	ESA	-a ⁴	Q ¹ A ³	--	q-	--	--	--	--	--	qa	qa	QA ⁷
	INPE	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	QA
Termo-vácuo	ESA	QA ⁵	qa	QA ⁶	QA	QA	qa	QA	QA	QA	qa	QA	QA ⁷
	INPE	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA	QA
Ciclagem Térmica	ESA	QA	qa	QA ⁶	QA	QA	qa	QA	QA	QA	qa	QA	qa
	INPE	QA	qa	QA	qa	qa	qa	qa	QA	qa	qa	QA	qa
Pressão	ESA	Q ³ -	--	Q ³ A ³	QA	QA	QA	qa	--	--	--	--	--
	INPE	--	--	--	QA	QA	QA	qa	--	--	--	--	--
Choque Térmico	ESA	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	INPE	--	Q-	--	--	--	--	--	Q-	Q-	--	q-	Q-

Legenda:

Q → Nível de qualificação (mandatório),

A → Nível de aceitação (mandatório)

q → Nível de qualificação (opcional)

a → Nível de aceitação (opcional)

- → Não requerido

Notas:

- 1- Se apropriado pode-se optar pela escolha entre vibração randômica ou teste acústico;
- 2- Necessário para equipamento sensível às condições ambientais e localizado em zonas onde as condições ambientais são críticas;
- 3- Necessário apenas para equipamento selado ou pressurizado;
- 4- Se o equipamento é sensível a ambiente acústico, o teste será realizado ao invés do teste de vibração randômica;
- 5- Necessário apenas para equipamento em unidades não-seladas e de alta energia, Equipamento de RF;
- 6- Não necessário para baterias que não podem ser recarregadas após o teste;
- 7- A não ser que já esteja incluso no teste do elemento.

Lista de equipamentos:

A= Equipamentos elétricos e eletrônicos;

B= Antenas;

C= Baterias;

D= Válvulas;

E= Fluido ou equipamento de propulsão;

F= Vasos de Pressão;

G= Trusters;

H= Equipamentos Térmicos;

I= Equipamentos Óticos;

J= Equipamentos Mecânicos;

K= Montagens Mecânicas que se movimentam;

L= Painéis Solares.

Ainda que, em grande parte, a programação de testes adotada pelo INPE, no projeto CBERS 3 & 4, seja muito próxima à recomendada pelo padrão ECSS, o programa espacial brasileiro possui algumas características específicas, adaptadas às suas necessidades e possibilidades, que valem a pena ser destacadas.

De forma geral, o programa espacial brasileiro tem desenvolvido tecnologia com base na experiência adquirida ao longo de poucas décadas e, sobretudo, pelo apoio normativo proporcionado por outras instituições de grande reconhecimento, como a ESA e a NASA. Ainda assim, existem diferenças entre os testes ambientais mandatórios realizados pelo INPE, no programa CBERS, em relação ao recomendado pelo padrão ECSS. Podem-se destacar três diferenças como sendo as principais, as quais são apresentadas a seguir.

- ***Choque Térmico***

Uma diferença relevante, observada na Tabela 2, se refere à aplicação mandatória do teste de choque térmico pelo INPE para alguns tipos de equipamentos, diretiva inexistente no padrão ECSS. Não se encontra documentada⁶, de forma categórica, a razão deste fato. Cabem, aqui, porém, algumas especulações, alimentadas pelo fato de que, na experiência do INPE, grande parcela das falhas ocorridas em testes térmicos têm sua origem ou em junções de soldagem de componentes, ou nos próprios componentes ou, ainda, em conexões. O teste de choque térmico possui a virtude de, com grande margem de acerto, revelar tais falhas. Adicionalmente, este teste apresenta o potencial de detectar inconsistências de projeto relativas à escolha de componentes, materiais e processos de fabricação. Assim, na experiência do INPE, o choque térmico coopera para reduzir a possibilidade de mortalidade infantil do equipamento em voo, ao mesmo tempo em que reprova equipamentos antes que estes cheguem a testes mais onerosos, como os de ciclagem térmica ou termo-vácuo, com significativo impacto positivo sobre custo e prazo.

- ***Teste acústico***

Além de diferenças entre a metodologia adotada pelo INPE e aquela recomendada pelo padrão ECSS, observa-se, também, interpretação diferente quanto ao nível de obrigatoriedade de tais testes. No INPE, o teste acústico pode ser substituído pelo teste randômico, conforme a característica do projeto, e considerações acerca do uso da infra-estrutura para testes acústicos. Por exemplo, no caso do projeto CBERS 3 & 4, as antenas de telemetria e telecomando são de pequeno porte, possuem pequenas áreas, fato que inviabiliza a utilização de uma câmara acústica reverberante de grande porte, como a do INPE, para testá-las e, também, faz com que os requisitos sejam melhor verificados através de um teste de vibração randômica. Neste caso, trata-se de uma contingência imposta pelas instalações de teste do INPE, porém, satisfatoriamente contornável pela adoção do teste randômico.

- ***Choque mecânico***

O teste de choque mecânico é mandatório no programa CBERS para todas as categorias/tipos de equipamentos. Esta obrigatoriedade inexistente na referência normativa ECSS, a não ser em casos em que o equipamento seja considerado sensível às condições ambientais, e ainda assim, somente se estiver localizado em zonas onde tais condições sejam críticas. A Nota 2, na Tabela 2, indica que a aplicação do teste de choque mecânico em equipamentos eletrônicos é opcional para projetos considerados robustos, caso contrário, somente se o equipamento se encontrar em posições sujeitas à maior influência do ambiente, é mandatória.

Em uma síntese inicial, comparando a política de verificação de requisitos adotada pelo INPE, pelo método teste, com a recomendada pelo padrão ECSS, no que se refere aos testes ambientais, observa-se que existem diferenças nos testes de choque térmico, acústico e choque mecânico. Em uma primeira análise, consideramos que tais diferenças possam ser atribuídas, de forma particular,

⁶ Ao menos, até o nível da documentação acessada por este estudo.

às necessidades específicas de um projeto, e, de forma geral, à experiência organizacional acumulada.

CONCLUSÕES

A experiência acumulada de uma organização no uso de tecnologias e processos, aliada ao volume de experimentação, proporciona grande confiança quanto à utilização mandatória ou não de determinados testes, como os de choque mecânico ou térmico, como instrumento de verificação de requisitos. Um perfeito domínio do entendimento de qual tecnologia (montagens, componentes, encapsulamentos, e outras) é sensível ou não a determinados ambientes somente pode ser adquirido após experiência em um grande volume de projetos e através de programas exaustivos de investigação. Tais investigações dependem, por exemplo, de planejamento antecipado e, ainda, da disponibilidade de recursos materiais e humanos. Historicamente, pode-se perceber que nenhuma destas condições é satisfeita pelo INPE, quando o compararmos a outras instituições como a ESA ou a NASA. Considerações ao longo desta linha, talvez expliquem por que a política de testes implementada pelo INPE é mais conservadora do que aquela preconizada pelo próprio padrão ECSS.

Entre outras questões, também associadas ao panorama do programa espacial brasileiro, que interferem de forma direta não só nos ciclos de verificação como também no amadurecimento das organizações executoras do programa espacial, podemos, tentativamente, destacar:

- os cronogramas de desenvolvimento de equipamentos e subsistemas são, via de regra, demasiado justos para que inovações tecnológicas possam ser desenvolvidas e ainda contribuam para que o conhecimento adquirido possa se estender as demais empresas desenvolvedoras;
- inexistente, atualmente, uma padronização por parte do INPE para a utilização de processos aprovados para uso espacial, o que faz com que cada fornecedor do programa seja obrigado a desenvolver novamente processos de fabricação já desenvolvidos anteriormente, desperdiçando tempo e recursos;
- o INPE e seus fornecedores não se utilizam de sistemas de *Alerta*⁷ ou *Lessons Learned*⁸ (ESA, workshop 1999) como os já utilizados por outras instituições como a ESA e a NASA, o que torna o progresso tecnológico moroso e a reincidência de falhas uma possibilidade real;
- inexistem fornecedores brasileiros para partes e materiais utilizados nos satélites brasileiros devido, entre outros fatores, à baixa demanda do programa e ao alto custo para desenvolvimento destes fornecedores; a utilização de partes e materiais de aplicação espacial é, também, prejudicada por barreiras de importação; tal fato dificulta que sejam realizadas investigações a respeito dos limites das propriedades de partes e materiais, uma vez que se enfrenta a escassez dos mesmos.

Apesar das questões e dificuldades apontadas neste trabalho, há já experiência acumulada na área de verificação e testes, destacando-se os seguintes aspectos positivos:

- as verificações de requisitos considerados críticos, ainda que em muitos casos sem uma justificativa clara da metodologia empregada, não deixam de ser realizadas;
- o programa espacial brasileiro, compensando o baixo volume de projetos desenvolvidos, aproveitou de forma satisfatória o conhecimento gerado por outras organizações; porém, para que a capacitação espacial brasileira avance, há a necessidade de que se criem oportunidades para que o conhecimento gerado no próprio INPE seja aproveitado de forma mais efetiva e eficiente;

⁷ Relatório informativo produzido por um usuário ou fabricante alertando sobre falhas ou problemas verificados com o uso de determinado item para outras organizações que também o usam a fim de evitar problemas semelhantes.

⁸ Relatório informativo a respeito de determinado conhecimento ou compreensão adquirida pela experiência e que tem um impacto significativo para uma organização. A experiência pode ser positiva ou negativa.

- o INPE possui uma infra-estrutura de testes adequada para atender às necessidades do programa espacial brasileiro, adaptando convenientemente os meios de teste quando necessário; mesmo assim, há a necessidade de que sejam feitos investimentos materiais e de qualificação de recursos humanos que viabilizem a execução de estudos avançados.

Como conclusão final, apontamos a necessidade de que o INPE busque excelência e auto-suficiência em termos de meios para a verificação de requisitos, de modo que se capacite para o desenvolvimento autônomo de plataformas orbitais.

6. Referências

ABNT, "Sistema de Gestão da Qualidade- Fundamentos e Vocabulário", NBR-ISO 9000, Associação brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p.22, 2005.

ARAUJO, J. E. et AL., 2008: Sistema Adaptativo de Decisão em Aplicações Espaciais Vácuo-Térmicas. Disponível em: <http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m16%4080/2008/07.16.14.55/doc/Araujo_worcap-INPE-03.pdf> Acessado em 05 jan. 2010.

ECSS, "Space Engineering – Verification", ECSS-E-10-02A, ESA Requirement and Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, p.51, 1998.

ECSS, "Glossary of terms", ECSS-P-001B, ESA Requirement and Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, p.15, 2004.

ECSS, "Space Engineering – Testing", ECSS-E-10-03A, ESA Requirement and Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, p.14, 2002a.

Ibid., p.55, 2002b.

Ibid., p.57, 2002c.

Ibid., p.44, 2002d.

Ibid., p.101, 2002e.

ECSS, "Space Engineering – Verification", ECSS-E-ST-10-02C, ESA Requirement and Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, p.14, 2009a.

Ibid., p.17-18, 2009b.

Ibid., p.12, 2009c.

ECSS, "Space Engineering – Structural Factors of Safety for Spaceflight Hardware", ECSS-E-ST-32-10C, ESA Requirement and Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, p.11-14, 2009d.

ESA, workshop, 1999: Alerts and Lessons Learned-An effective way to prevent failures and problems. Disponível em: <<http://conferences.esa.int/99c06/index.html>> Acessado em 20 fev. de 2010.

INPE, “CBERS 3&4 Verification Guidelines”, RB-MNG-1022/00, Joint Project Organization, São José dos Campos, p.5, 2005.

INPE, “CBERS 3&4 Environmental Specification”, RB-EVS-0001/02, Joint Project Organization, São José dos Campos, p.25,2008.

SOUZA,P.NORONHA,2008: Curso Introdutório em Tecnologia de Satélites-Missões e Segmentos. Disponível em:
<http://www.inpe.br/twiki/pub/Main/IntroducaoTecnologiaSatelites/120_Satelites_P1.2_v3_2008.pdf> Acessado em 15 nov. 2009b

SOUZA,P.NORONHA,2009: Curso Introdutório em Tecnologia de Satélites-Interfaces com o Veículo Lançador. Disponível em:
<http://www.inpe.br/twiki/pub/Main/IntroducaoTecnologiaSatelites/240_Satelites_P2.7.2_v3_2009.pdf> Acessado em 12 jan. 2010