



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

Ramon de Araujo Borba

Plano de testes para módulos de gerenciamento de energia de CubeSats

Florianópolis
2024

Ramon de Araujo Borba

Plano de testes para módulos de gerenciamento de energia de CubeSats

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.
Orientador: Prof. Eduardo Augusto Bezerra, Dr.

Ficha de identificação da obra

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor.

Orientações em:

<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Ramon de Araujo Borba

Plano de testes para módulos de gerenciamento de energia de CubeSats

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Eletrônica” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica.

Florianópolis, 27 de Fevereiro de 2024.

Prof^ª. Daniela Ota Hisayasu Suzuki, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Eduardo Augusto Bezerra, Dr.
Orientador

Kleber Gouveia, Msc.
Avaliador
Instituição xxxx

Gabriel Mariano Marcelino, Msc.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

João Cláudio Elsen Barcellos, Eng.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e a minha família por todo o apoio nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Inserir os agradecimentos aos colaboradores à execução do trabalho.

[illegible]

*“Texto da Epígrafe.
Citação relativa ao tema do trabalho.
É opcional. A epígrafe pode também aparecer
na abertura de cada seção ou capítulo.
Deve ser elaborada de acordo com a NBR 10520.”
(Autor da epígrafe, ano)*

RESUMO

No resumo são ressaltados o objetivo da pesquisa, o método utilizado, as discussões e os resultados com destaque apenas para os pontos principais. O resumo deve ser significativo, composto de uma sequência de frases concisas, afirmativas, e não de uma enumeração de tópicos. Não deve conter citações. Deve usar o verbo na voz ativa e na terceira pessoa do singular. O texto do resumo deve ser digitado, em um único bloco, sem espaço de parágrafo. O espaçamento entre linhas é simples e o tamanho da fonte é 12. Abaixo do resumo, informar as palavras-chave (palavras ou expressões significativas retiradas do texto) ou, termos retirados de thesaurus da área. Deve conter de 150 a 500 palavras. O resumo é elaborado de acordo com a NBR 6028.

Palavras-chave: Palavra-chave 1. Palavra-chave 2. Palavra-chave 3.

ABSTRACT

Resumo traduzido para outros idiomas, neste caso, inglês. Segue o formato do resumo feito na língua vernácula. As palavras-chave traduzidas, versão em língua estrangeira, são colocadas abaixo do texto precedidas pela expressão “Keywords”, separadas por ponto.

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de testes geral de um CubeSat	20
Figura 2 – Diagrama de blocos básico de um Electrical Power System (EPS) . . .	23
Figura 3 – Diagrama de blocos do EPS 2.0	27
Figura 4 – Diagrama de blocos do RE ² PS	28

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Matriz de testes do EPS 2.0.	32
Tabela 3 – Tipos de testes executados em campanha de testes de EPSs	43
Tabela 4 – Matriz de testes base	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIV	Assembly, Integration and Verification
BCR	Battery Charge Regulator
CDS	Cubesat Design Specification
COTS	Commercial-off-the-shelf
DET	Direct Energy Transfer
DoD	Depth of Discharge
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EPS	Electrical Power System
EPS 2.0	Electrical Power System 2.0
ESA	European Space Agency
I ² C	Inter Integrated Circuit
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OBDH	On Board Data Handling
P&O	Perturb and Observe
PPT	Peak Power Transfer
PWM	Pulse Width Modulation
RE ² PS	Reliability Enhanced Electrical Power System
TT&C	Telemetry Tracking & Command
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	FALHAS EM CUBESATS	15
1.2	PROJETOS DO SPACELAB	16
1.3	MOTIVAÇÃO	17
1.4	OBJETIVOS	17
1.4.1	Objetivo Geral	17
1.4.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO	19
2.1	O PADRÃO CUBESAT	19
2.2	NORMAS E PADRÕES DE TESTES	19
2.2.1	CubeSat Design Specification	20
2.2.2	European Cooperation for Space Standardization	21
2.3	TOPOLOGIAS E ARQUITETURAS DE EPS	23
2.3.1	Topologias	23
2.3.2	Arquiteturas	24
2.3.2.1	Aalto-2 EPS	24
2.3.2.2	ESTCube-1	25
2.3.2.3	GomSpace NanoPower P31u e BP4	26
2.3.2.4	EPS 2.0	26
2.3.2.5	RE ² PS	28
2.4	CAMPANHAS DE TESTE DE EPS	29
2.4.1	Aalto-2	29
2.4.2	ESTCube-1	30
2.4.3	MIST	30
2.4.4	EPS 2.0	31
3	METODOLOGIA	35
4	DESENVOLVIMENTO	36
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
4.1.1	Nível de Verificação	36
4.2	DOCUMENTAÇÃO	38
4.2.1	Estrutura do Plano de Testes	39
4.3	OBJETIVOS DO PLANO DE TESTES	40
4.4	LINHA DE BASE DE TESTES	40
4.5	TESTES FUNCIONAIS, DE PERFORMANCE E DE MISSÃO	41
4.6	MATRIZ DE TESTES BASE	43
4.7	REQUISITOS GERAIS	47
5	PLANO DE TESTES BASE	49

6	ESTUDO DE CASO - EPS 2.0	50
7	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A – PLANO DE TESTES BASE	55
	APÊNDICE B – PLANO DE TESTES EPS 2.0	79

1 INTRODUÇÃO

Desde a criação do padrão CubeSat em 1999, nano satélites tem sido utilizados em cada vez mais aplicações. Popularizado inicialmente no meio acadêmico, possibilitando à universidades o desenvolvimento de missões espaciais de baixo custo, atualmente estes satélites são utilizados para diversas aplicações, como observado em Sweeting (2018).

Inicialmente os CubeSats, que seguem as especificações definidas no documento Cubesat Design Specification (CDS) (CAL POLY, 2022), serviam um propósito didático, com aplicações de demonstração de tecnologia, experimentos científicos. Porém, recentemente, aplicações comerciais de nano satélites e CubeSats tem ganhado espaço, tanto que em 2014 o numero de lançamentos de nano satélites com propósito comercial ultrapassou os de propósito acadêmico (SWEETING, 2018).

Com o advento de conceitos como “New Space” e a percepção de sua utilidade comercial, os CubeSats estão entrando no radar de grandes empresas (SWEETING, 2018), inclusive sendo utilizados em missões espaciais de grandes instituições como a NASA no programa Artemis, que utilizará de CubeSats em sua missão com o objetivo de explorar a lua (NASA, 2020).

1.1 FALHAS EM CUBESATS

Com a proposta de baixo custo, rápido desenvolvimento e uso de componentes Commercial-off-the-shelf (COTS), a confiabilidade dos CubeSats foi significativamente reduzida em relação à satélites de grande porte, que utilizam componentes robustos desenvolvidos especificamente para aplicações espaciais e passam por processos rigorosos de testes, validação e qualificação. Como consequência disso, observaram-se grandes taxas de falhas em missões de CubeSats.

Conforme Bouwmeester e Guo (2010), até 2010, cerca de 32% dos lançamentos de nano satélites resultaram em falha, e considerando apenas os lançamentos bem sucedidos, apenas cerca de 48% das missões tiveram sucesso total.

O estudo de Swartwout (2013), similarmente aponta taxas de falha de aproximadamente 50% em missões acadêmicas de CubeSat. Também neste estudo, esta alta taxa é atribuída a uma carência de testes funcionais a nível de integração dos satélites, visto que, em missões acadêmicas, devido a cronogramas justos ou orçamentos limitados, costuma-se realizar apenas os testes ambientais requeridos para lançamento. Segundo o autor, estes testes são fundamentais para identificar possíveis falhas na operação do satélite.

No trabalho de Langer e Bouwmeester (2016), que analisou a causa de falha de diversos CubeSats lançados até 2014, aponta-se o EPS como principal módulo causador de falhas em CubeSats.

Para satélites de propósito educacional, de demonstração tecnológica, essa baixa confiabilidade é tolerável, visto que parte do objetivo destas missões inclui proporcionar

experiência e capacitação para estudantes. Porém, é inaceitável para aplicações comerciais (CHO *et al.*, 2012).

Esta taxa de falha, no entanto, vem se reduzindo desde então, com uma taxa de apenas 10% de falhas em lançamentos em 2018 (MONTEIRO *et al.*, 2019). O aumento no número de aplicações comerciais, desenvolvidas por equipes mais experientes e com mais recursos, é um dos fatores que tem contribuído para essa mudança. Outro fator importante, como relatado em Monteiro *et al.* (2019), missões acadêmicas tem dado maior atenção aos processos de Assembly, Integration and Verification (AIV).

Nota-se também que, em missões de CubeSats mais recentes, foram adotados procedimentos e padrões mais rigorosos, não só em relação à testes, mas em todo o processo de engenharia de sistemas e gerenciamento da missão. Trabalhos como Mariano *et al.* (2020) e Tiseo *et al.* (2019), por exemplo, tomaram como referência os padrões determinados pela European Cooperation for Space Standardization (ECSS), utilizados pela European Space Agency (ESA) e diversas outras agências espaciais da Europa.

1.2 PROJETOS DO SPACELAB

O FloripaSat-1, descrito em Mariano *et al.* (2020), foi o primeiro CubeSat desenvolvido e lançado pelo SpaceLab UFSC - Laboratório de Pesquisa em Sistemas Espaciais, com uma missão de demonstração tecnológica de sua plataforma de serviço multi-missão totalmente desenvolvida por estudantes da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A plataforma de serviço FloripaSat consiste de três módulos principais, On Board Data Handling (OBDH), responsável pelo controle e gerenciamento de dados, Telemetry Tracking & Command (TT&C), responsável pela comunicação com as estações terrestres e recepção de telecomandos, e EPS, responsável pela coleta, armazenamento e distribuição de energia.

Após o lançamento do FloripaSat-1, o SpaceLab continuou desenvolvendo e aprimorando sua plataforma de serviço para futuras missões, resultando no desenvolvimento da segunda geração de módulos, que em conjunto formam a plataforma FloripaSat-2 (MARCELINO *et al.*, 2023).

O Electrical Power System 2.0 (EPS 2.0) é a segunda geração de módulo EPS desenvolvido para a plataforma multi-missão do laboratório, será utilizado nas missões GOLDS-UFSC e Constelação Catarina e encontra-se nos estágios finais de desenvolvimento. Este EPS é uma evolução direta do módulo utilizado no FloripaSat-1, seguindo a mesma arquitetura, porém, aplicando as lições aprendidas com o primeiro lançamento.

Visto que o EPS é o principal causador de falhas em CubeSats, iniciou-se também no laboratório a concepção do Reliability Enhanced Electrical Power System (RE²PS), com o objetivo de desenvolver um módulo de EPS de alta confiabilidade e robustez, tanto em termos de resistência à radiação quanto resistência a falhas.

No momento da escrita deste trabalho, o primeiro modelo de engenharia do RE²PS

está em processo de fabricação. Também, a terceira geração de módulos para a plataforma multi-missão está em fase inicial de desenvolvimento, o que implicará no design de ainda mais um modelo de EPS feito no SpaceLab.

Com diferentes projetos, em diferentes estágios de desenvolvimento e diferentes arquiteturas de EPS sendo utilizadas nas missões do laboratório, percebeu-se a necessidade de aprimorar os procedimentos de teste utilizados, especialmente na etapa de qualificação, assim como a necessidade de avaliar a performance dos diferentes módulos de EPS.

1.3 MOTIVAÇÃO

Como observado anteriormente, processos de AIV mais rigorosos, seguindo padrões como ECSS adaptados para o cenário de um nano satélite, tem sido aplicados em missões envolvendo CubeSats, mais especificamente, na etapa de qualificação do satélite como um todo. Porém, em se tratando dos módulos individualmente, especificamente módulos de EPS, não se observam os mesmos cuidados e estruturação nos procedimentos de teste e a adoção desses padrões, quando mencionados, como em Barra (2019), ainda é de forma bastante simplificada.

Neste contexto, propõe-se então a elaboração de um documento contendo diretrizes e orientações acerca da elaboração de planos de testes para módulos EPS, baseado nos padrões da ECSS, adaptável para diferentes topologias e arquiteturas, a ser utilizado para os módulos de EPS desenvolvidos pelo SpaceLab.

Este trabalho consistira na realização de uma revisão de topologias e arquiteturas de EPSs para CubeSats, bem como de campanhas de teste executadas nestes módulos, seguida por uma análise das normas ECSS-E-ST-10-02 (ECSS SECRETARIAT, 2018) e ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b) relacionadas ao processo de verificação e testes, então, a partir destas análises, será elaborado um documento contendo uma série de diretrizes e orientações para a elaboração de planos de testes voltado para EPSs de CubeSats. Por fim, como demonstração, será elaborado um plano de testes para o EPS 2.0, seguindo as orientações propostas.

1.4 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.4.1 Objetivo Geral

Propor uma estrutura de plano de testes aplicável à diferentes topologias de módulos de EPSs de CubeSats baseado nos padrões da ECSS.

Elaboração de um documento contendo diretrizes e orientações para preparação de planos de teste para módulos EPS, baseado nas normas e padrões da ECSS, de forma que o mesmo seja aplicável à diferentes topologias e arquiteturas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analisar as normas da ECSS relacionadas a procedimentos de teste.
- Identificar os principais blocos de teste necessários.
- Identificar os principais funções e características de um EPS a serem testados.
- Propor uma estrutura de documentação para os testes.
- Desenvolver um plano de testes para o EPS 2.0 baseado na proposta deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 O PADRÃO CUBESAT

Os CubeSats são nano satélites padronizados, com critérios de tamanho, forma e peso específicos. Satélites neste padrão são compostos por uma ou mais unidades em formato cúbico, com aresta de 10cm e massa de até 2kg (CAL POLY, 2022). Cada unidade é chamada "1U", ou seja, um CubeSat formado por três unidades é categorizado com um CubeSat 3U.

Este padrão surgiu, em 1999, de um projeto colaborativo entre os professores Bob Twiggs (Stanford University) e Jordi Puig-Suari (California Polytechnic State University), chamado CubeSat Project, que tinha como objetivo promover o acesso ao ambiente espacial através da redução de custos e de tempo de desenvolvimento, possibilitando lançamentos mais frequentes (CAL POLY, 2022).

Pode-se identificar um conjunto de subsistemas fundamentais presentes no design de boa parte dos CubeSats. Nos trabalhos de Tiseo *et al.* (2019),- Bouwmeester e Guo (2010) e Langer e Bouwmeester (2016) foram identificados os seguintes principais subsistemas:

- a) gerenciamento de energia;
- b) gerenciamento de dados (computador de bordo);
- c) comunicação;
- d) determinação e controle de atitude e órbita;
- e) estrutura mecânica;
- f) controle térmico;
- g) propulsão.

Cada subsistema é geralmente implementado em um módulo dedicado, chamado módulo de serviço, e o conjunto destes módulos forma a plataforma de serviço do satélite, responsável por todas as funções e operações fundamentais de um CubeSat. De fato, no livro de Cappelletti, Battistini e Malphrus (2020), são apresentados tais módulos e discutidos os principais aspectos a serem considerados para o design e implementação de cada subsistema.

Além da plataforma de serviço, os CubeSats também são equipados com cargas úteis, ou payloads, que são os módulos responsáveis por realizar os objetivos específicos de cada missão.

2.2 NORMAS E PADRÕES DE TESTES

A principal referência a ser seguida em uma missão envolvendo CubeSats é o CubeSat Design Specification, ou CDS (CAL POLY, 2022), que é o documento que define as especificações do padrão CubeSat.

Além do CDS, recentemente, tem-se exemplos de missões de CubeSat seguindo os padrões e normas da ECSS, como Mariano *et al.* (2020), Tiseo *et al.* (2019) e Barra (2019), tanto para etapa de testes quanto para desenvolvimento da missão como um todo.

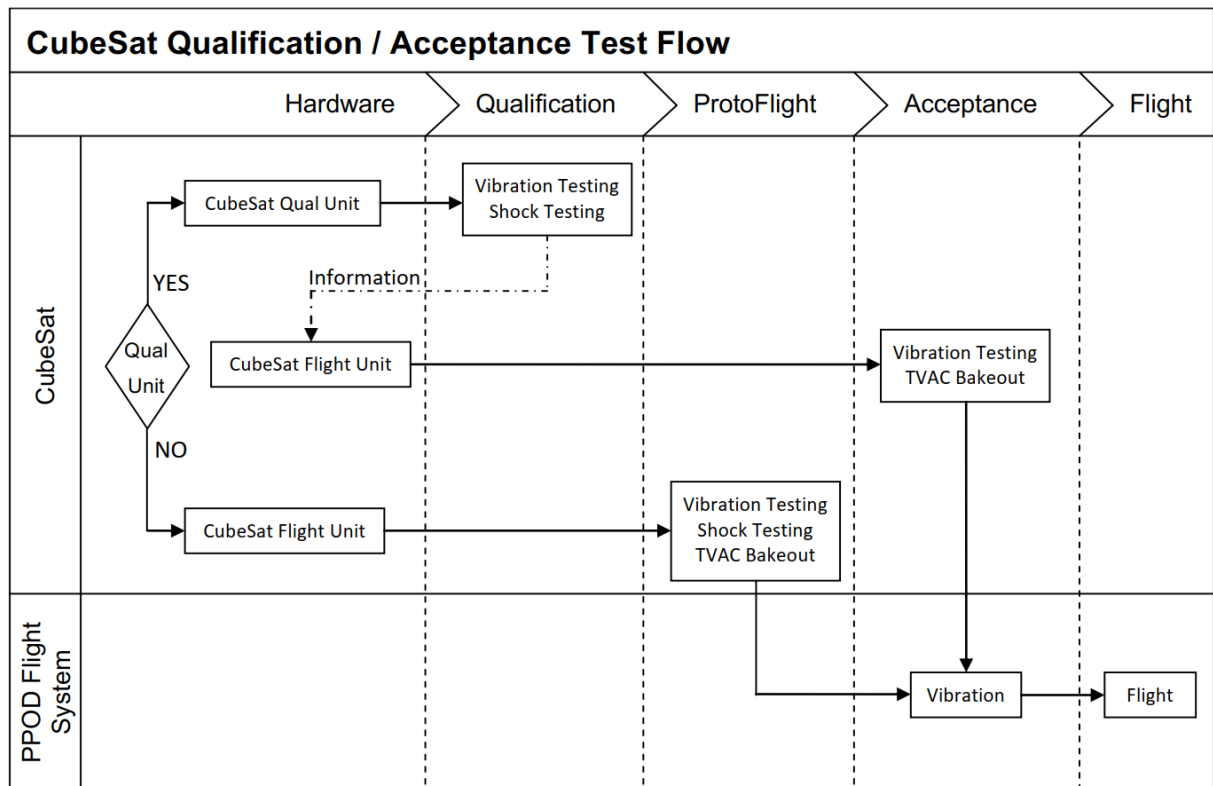
Ambas estas referências introduzem conceitos e requisitos relevantes à elaboração de um plano de testes que serão apresentados a seguir.

2.2.1 CubeSat Design Specification

O CDS é um documento contendo as especificações e requisitos básicos e servindo como ponto de partida para o design de CubeSats de 1U a 12U, mantido pela California Polytechnic State University. Requisitos gerais, mecânicos, elétricos, de operação e de testes são especificados, definindo as características básicas que constituem um nano satélite da classe CubeSat.

Os requisitos de testes descritos no CDS estão focados em testes ambientais para o CubeSat como um todo, já em estagio de qualificação para o lançamento. Como filosofia de testes, o CDS propõe as seguintes etapas: *qualification*, *acceptance* e *proto-flight*, executadas conforme o diagrama mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo de testes geral de um CubeSat



Fonte: Cal Poly (2022).

Os principais testes indicados pelo CDS são:

- a) Testes de vibração;
- b) Termo vácuo e bakeout;
- c) Testes de choque;
- d) Inspeção visual;

É importante ressaltar que estes requisitos de teste, bem como os parâmetros (intensidade, duração, etc...) de cada teste para cada etapa, como enfatizado no próprio documento, são apenas preliminares e servem somente como base. Os requisitos de teste oficiais para lançamento serão gerados pelo provedor do lançamento, e sempre tomarão precedência em relação aos requisitos do CDS ou a qualquer outro conjunto de requisitos.

2.2.2 European Cooperation for Space Standardization

A European Cooperation for Space Standardization, ou ECSS, é uma colaboração entre a ESA, a indústria espacial europeia e diversas outras agências espaciais, responsável por desenvolver e manter um conjunto de normas e padrões relacionados a atividades espaciais. Essas normas e padrões cobrem diversas disciplinas, como gerenciamento, engenharia, controle de qualidade e sustentabilidade.

Dentro do ramo de engenharia, tem-se os documentos ECSS-E-ST-10-02 (ECSS SECRETARIAT, 2018), ECSS-E-HB-10-02 (ECSS SECRETARIAT, 2010), ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b) e ECSS-E-HB-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022a), que determinam requisitos para os processos de verificação e testes. Estes documentos são redigidos de forma abrangente, com o objetivo de que, a partir de um processo de tailoring, possa-se aplicar estas normas e padrões em diversos níveis, tanto ao satélite completo quanto a um módulo isoladamente. Como complemento às normas ECSS-E-ST-10-02 e ECSS-E-ST-10-03, tem-se também o documento ECSS-S-ST-00-01 (ECSS SECRETARIAT, 2023), um glossário onde diversos termos e definições utilizados nas demais normas são apresentados. Vale ressaltar também que estes documentos não são específicos para nano satélites, mas foram pensados para satélites de médio e grande porte, onde se necessita uma rigorosidade extrema nos processos de AIV. Portanto deve-se levar em consideração o cenário de uma missão de CubeSat e fazer as adaptações necessárias ao se aplicar estas normas, especialmente em uma missão universitária, visando simplicidade, baixo custo e rápido desenvolvimento.

De acordo com as normas citadas acima, testes são considerados como um dos métodos utilizados para o processo de verificação. Com isso, apesar deste trabalho ser focado em testes, alguns conceitos relacionados ao processo de verificação, introduzidos em (ECSS SECRETARIAT, 2018), como *verification levels*, *verification stages* e *model philosophy*, influenciam diretamente nos objetivos e na elaboração do plano de testes.

Similarmente à filosofia de testes apresentada pelo CDS, em ECSS Secretariat (2022b) tem-se os conceitos de *qualification testing*, *acceptance testing* e *proto-flight testing*,

que determinam os objetivos do plano de testes.

A seguir são apresentados estes conceitos:

a) *verification levels*:

- os níveis de verificação estão relacionados à decomposição do produto final, neste caso um CubeSat. estes níveis podem variar de acordo com a complexidade do projeto.
- o processo de verificação é executado em cada um dos níveis definidos para um projeto ou missão.

b) *verification stages*:

- o processo de verificação é feito em estágios, com objetivos específicos. os principais estágios apresentados em ECSS Secretariat (2018) são *qualification*, *acceptance*, *pre-launch*, *in-orbit*, e *post-landing*.
- o estágio de *qualification* visa garantir que o design proposto para a missão é capaz de cumprir com os requisitos no ambiente esperado.
- o estágio de *acceptance* visa demonstrar que o modelo final **modelo físico de voo** está em conformidade com o design qualificado previamente

c) *model philosophy*:

- o conceito de *model philosophy* está relacionado ao tipo e quantidade de modelos físicos utilizados durante o desenvolvimento, verificação e testes.
- em (ECSS SECRETARIAT, 2010), diversos tipos de modelos são apresentados e descritos. considerando uma missão de CubeSat, os principais modelos aplicáveis são: modelo de engenharia, modelo de qualificação, modelo de proto-flight e modelo de voo.

d) *qualification testing*:

- testes de qualificação (chamado *qualification testing* na ECSS-E-ST-10-03) tem o objetivo de verificar que o design do objeto sobre teste é capaz de satisfazer todos os seus requisitos. Estes testes são conduzidos em modelos de qualificação dedicados e com parâmetros de teste (intensidade, duração) específicos.

e) *acceptance testing*:

- testes de aceitação (chamado *acceptance testing* na ECSS-E-ST-10-03) tem o objetivo de verificar que o objeto sobre teste está em conformidade com o design que foi qualificado previamente e se encontra livre de defeitos de fabricação. Estes testes são conduzidos em todos os modelos de voo e com parâmetros de teste (intensidade, duração) específicos para *acceptance testing*.

f) *proto-flight testing*:

- testes proto-flight (chamado *proto-flight testing* na ECSS-E-ST-10-03) podem ser executados no primeiro modelo de voo e combinam os objetivos dos testes de qualificação e aceitação. Os parâmetros de teste (intensidade, duração) utilizam as intensidades definidas para qualificação com as durações definidas para aceitação.

2.3 TOPOLOGIAS E ARQUITETURAS DE EPS

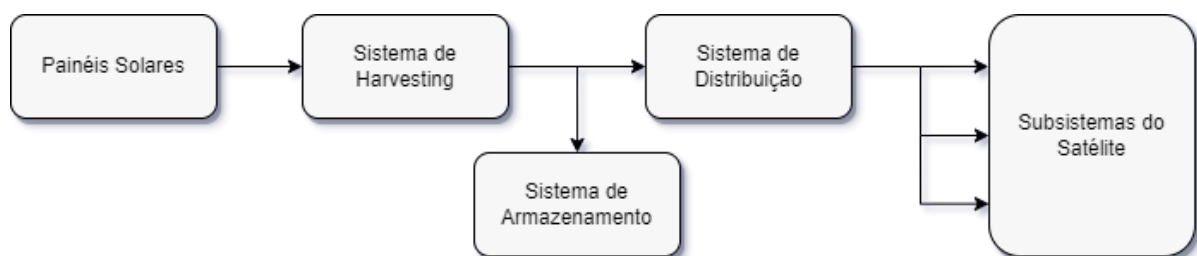
Nesta seção serão apresentadas diferentes topologias e arquiteturas de EPS para CubeSats com o intuito de identificar os principais aspectos e características relevantes para a criação de um plano de testes.

Neste trabalho, topologia se refere a uma visão de alto-nível dos principais blocos funcionais do sistema e arquitetura se refere ao modo como uma dada topologia é implementada.

2.3.1 Topologias

Um módulo EPS é composto por alguns elementos básicos, mostrados na Figura 2. O sistema de harvesting é responsável por extrair energia dos painéis solares, que são a fonte primária de energia dos CubeSats. O sistema de armazenamento de energia é utilizado para alimentar o satélite em períodos de eclipse ou em situações de alta demanda de energia. O sistema de distribuição é responsável por entregar a energia coletada e armazenada pelo EPS de forma adequada às cargas. Cargas típicas de um EPS envolvem os demais subsistemas do satélite, desde de módulos de serviço, como OBDH e TT&C, quanto cargas úteis que variam conforme os objetivos de cada missão. O barramento que interliga estes elementos, no contexto deste trabalho, será chamado de barramento principal.

Figura 2 – Diagrama de blocos básico de um EPS



Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo de Edpuganti *et al.* (2022) mostra uma revisão de diferentes topologias de EPS utilizados em diversas missões e propõe uma forma de classifica-los de acordo com quatro aspectos principais em comum nas diversas topologias:

- a) Estágios de conversão;
- b) Tipo de distribuição;
- c) Tipo de sistema de harvesting;
- d) Regulação do barramento principal;

Estágios de conversão refere-se à quantidade de conversões de energia realizadas até que a energia dos painéis ou baterias seja entregue às cargas. Até o momento, encontram-se em publicações ou patentes apenas topologias com múltiplos estágios de conversão para EPSs de CubeSats (EDPUGANTI *et al.*, 2022).

Em relação à localização dos conversores dos barramentos de saída, tem-se topologias centralizadas, com os conversores localizados num mesmo local ou na mesma PCB, ou distribuída, com os conversores localizados em diferentes locais ou PCB com o intuito de estarem fisicamente mais próximos às cargas.

Em relação ao tipo de sistema de harvesting, que realiza a interface com os painéis solares, tem-se topologias com Direct Energy Transfer (DET), onde os painéis são conectados diretamente ao sistema de armazenamento e/ou aos reguladores das cargas, ou topologias com Peak Power Transfer (PPT), onde os painéis são conectados à conversores dc-dc operados de forma a realizar Maximum Power Point Tracking (MPPT). Adicionalmente, no estudo de Kessler Slongo *et al.* (2020), diferenciam-se entre utilização de conversores discretos ou via circuitos integrados, e também apresenta-se a utilização de reguladores VLDO para a interface com os painéis solares.

Em relação à regulação do barramento principal, tem-se topologias com barramento principal regulado, onde há um conversor regulando o mesmo para uma tensão de referência, não-regulado, onde os terminais da bateria são conectados diretamente ao barramento, ou parcialmente regulado, em que o barramento é regulado apenas durante o período iluminado da órbita.

2.3.2 Arquiteturas

A seguir serão analisadas as arquiteturas de diferentes modelos de EPS, tanto de desenvolvimento próprio quanto modelos comerciais, a fim de identificar aspectos e características em comum relevantes para o desenvolvimento do plano de testes.

2.3.2.1 Aalto-2 EPS

O EPS desenvolvido para o satélite Aalto-2, descrito em Hemmo (2013), utiliza uma topologia de distribuição centralizada, conversão múltiplo estágio, sistema de harvesting com PPT e barramento principal não regulado. Além disso, possui um microcontrolador MSP430 para controle e monitoramento e redundâncias em hardware para as funcionalidades principais como conversores DC-DC, reguladores de carga de bateria e MPPT.

O sistema de harvesting deste EPS possui dois canais com CIs dedicados para a realização de MPPT. O conjunto de painéis solares de cada eixo, X e Y, é ligado ao barramento principal através de um Battery Charge Regulator (BCR), neste caso o LT3652.

Para armazenamento de energia o EPS do Aalto-2 utilizará duas células de baterias em paralelo (configuração 1s2p). O modelo das baterias ainda não havia sido determinado, porém a inclusão de circuitos de proteção contra over-charge e over-discharge, assim como a necessidade de um sistema de aquecimento para as baterias já estavam previstos.

O sistema de distribuição consiste em dois barramentos, de 3.3V e 5V, utilizando os reguladores LTC1875 e LTC3122 respectivamente. Cada barramento possui reguladores duplicados em redundância fria. Possui também um barramento dedicado para alimentar o microcontrolador. Para controle dos barramentos foram utilizados MOSFETs MAX890L, que além de atuarem como chaves, possuem limitação de corrente proporcionando proteção contra over-current. Além disso, corrente e tensão nos barramentos são monitoradas pelo microcontrolador.

Para controle e monitoramento, foi utilizado o microcontrolador MSP430-F1611. Tensões, correntes e temperaturas são medidas através do CI LTC2991. Os seguintes dados de telemetria são monitorados e transmitidos ao computador de bordo pelo EPS:

- a) Tensões, correntes e temperaturas dos painéis solares.
- b) Tensões, correntes e temperaturas de cada célula das baterias.
- c) Status de carga das baterias.
- d) Tensões e correntes nos barramentos de saída do EPS.

2.3.2.2 ESTCube-1

O EPS desenvolvido para o satélite ESTCube-1, descrito em Pajusalu *et al.* (2014), utiliza uma topologia de distribuição centralizada, conversão multe estágio, sistema de harvesting com PPT e barramento principal não regulado. Possui também um microcontrolador para controle e monitoramento e inclui redundâncias em hardware.

O sistema de harvesting é composto por três canais de MPPT. Cada canal utiliza um chip SPV1040 para a realizar o MPPT de um conjunto de painéis correspondente a um dos eixos do satélite.

Duas células de bateria de íon de lítio são utilizadas para armazenamento, com monitoramento de tensão, corrente e temperatura. Cada célula é conectada ao barramento principal através de duas chaves de potência TPS2557, controlando as direções de carga e descarga separadamente e servindo como proteção.

O sistema de distribuição é composto por três barramentos, 3.3V, 5V e 12V, utilizando os reguladores LTC3440 para os barramentos de 3.3V e 5V, e LM2700 para o barramento de 12V. Cada barramento possui os conversores duplicados em redundância

quente. O microcontrolador e outros circuitos do EPS são alimentados por um barramento secundário dedicado. Os barramentos possuem também chaves de potência, TPS2551 ou TPS2557, com proteção contra over-current, que conectam os reguladores tanto ao barramento principal quanto aos barramentos de saída.

O controle deste EPS é realizado por um microcontrolador ATmega1280 e utiliza de memórias FRAM para armazenamento do firmware, variáveis de controle e variáveis de estado. Comunicação com os outros módulos do satélite é feita via Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART). O monitoramento é realizado através de 44 sensores de tensão e corrente em diversos pontos do sistema e um conjunto de ADCs dedicados, além ADC interno do microcontrolador.

Este EPS é responsável por realizar os procedimentos de inicialização do satélite pós lançamento e também por controlar o rádio de transmissão do beacon.

2.3.2.3 GomSpace NanoPower P31u e BP4

O NanoPower P31u (NANOPOWER P31U..., 2023) é um modelo comercial de EPS fabricado pela empresa GomSpace. Utiliza uma topologia de distribuição centralizada, conversão multe estágio, sistema de harvesting com PPT e barramento principal não regulado. Possui também um microcontrolador para controle, configuração e comunicação.

O sistema de harvesting consiste de três canais com conversores para realização de MPPT, controlados pelo microcontrolador.

O sistema de distribuição utiliza de dois barramentos regulados, de 3.3V e 5V, e seis canais de saída controlados por chaves de potência com limitação de corrente, configuráveis individualmente para 3.3V ou 5V.

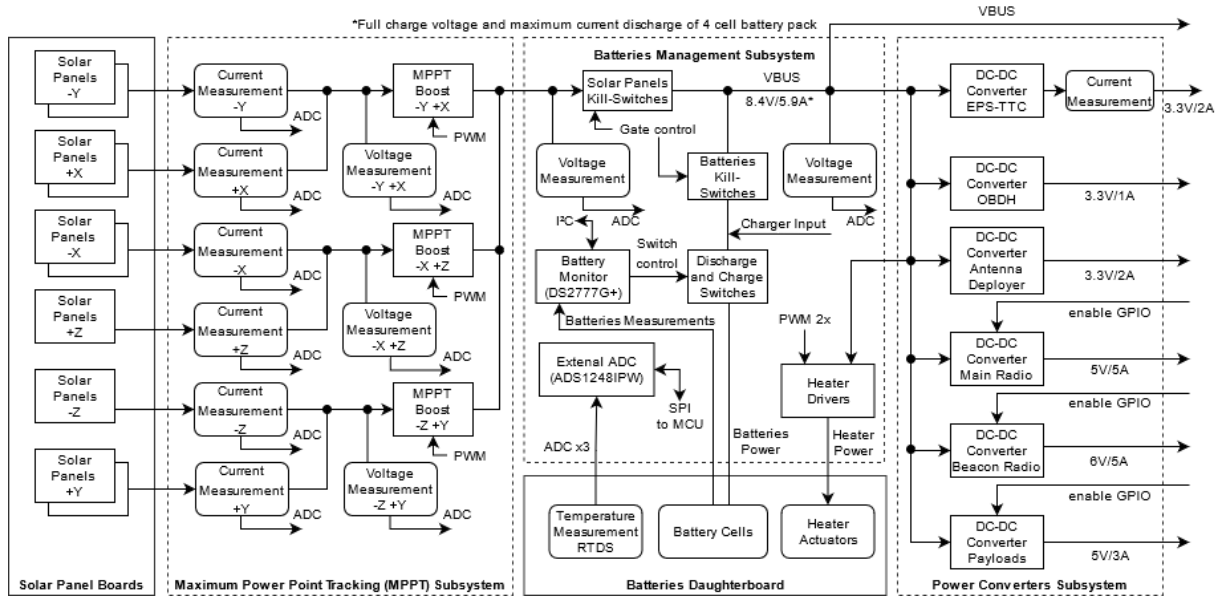
Um microcontrolador é responsável pelo gerenciamento do EPS e o comportamento pode ser configurado pelo usuário via interface Inter Integrated Circuit (I²C). Dentre as funcionalidades tem-se: modo de operação do MPPT, acesso aos logs de tensões, correntes e temperaturas em diversos pontos do sistema, acionamento de aquecedor de baterias, controle dos canais de saída.

Este EPS é comumente utilizado em conjunto com o módulo de baterias NanoPower BP4 (NANOPOWER BP4..., 2023), que é uma das opções de armazenamento oferecidas pela empresa GomSpace. Este módulo utiliza quatro células de baterias de íon de lítio configuradas em 2s-2p ou 4s-1p. Possui sensores de temperatura com interface digital e aquecedor para as baterias.

2.3.2.4 EPS 2.0

Como mencionado na Seção 1.2, o EPS 2.0 é uma evolução direta do módulo EPS utilizado no FloripaSat-1 (MARIANO *et al.*, 2020) e está em estágio final de desenvolvimento. A documentação do EPS 2.0 pode ser encontrada em (SPACELAB, 2023a), a Figura 3 mostra o diagrama de blocos deste sistema.

Figura 3 – Diagrama de blocos do EPS 2.0



Fonte: SpaceLab (2023a).

Este módulo implementa uma topologia de distribuição centralizada, com múltiplos estágios de conversão, sistema de harvesting com PPT e barramento principal não regulado. Possui também um microcontrolador para operação, leitura de sensores e comunicação com os demais módulos do satélite.

O sistema de harvesting consiste em três canais com conversores boost discretos e sensores de tensão e corrente, controlados individualmente pelo microcontrolador para realizar MPPT, utilizando o algoritmo de Perturb and Observe (P&O).

O sistema de distribuição consiste em seis barramentos com conversores dedicados, de 3.3V, 5V ou 6V, para cada um dos módulos do satélite, que podem ser ativados ou desativados individualmente.

O sistema de armazenamento consiste de um sistema de monitoramento (chamado *Batteries Management Subsystem* na Figura 3) e de um módulo de baterias separado (chamado *Batteries Daughterboard* no diagrama da Figura 3), que pode ser acoplado ao EPS 2.0. O módulo de baterias contém 4 células de baterias de íon de lítio em configuração 2s-2p, bem como sensores de temperatura e aquecedores que podem ser lidos e controlados pelo microcontrolador do EPS. O sistema de monitoramento é realizado pelo CI DS2777G+, que realiza leituras de tensão e corrente das baterias, proteção contra over-charge e over-discharge, estimativas de vida útil e monitoramento do estado de carga das baterias. Os sensores de temperatura são lidos por um conversor AD dedicado ADS1248 e utilizados para controle dos aquecedores de bateria, os driver para acionamento dos aquecedores, assim como o conversor AD, ficam no próprio EPS e são controlados pelo microcontrolador.

O microcontrolador utilizado é um MSP430F6659 de 16 bits e de baixo consumo.

Os sinais de todos os sensores podem ser acessados e lidos através de um multiplexador analógico presente no EPS.

2.4 CAMPANHAS DE TESTE DE EPS

Além da arquitetura dos módulos, alguns dos trabalhos analisados apresentaram também os testes realizados em seus EPSs, que serão apresentados a seguir.

2.4.1 Aalto-2

No trabalho de Hemmo (2013), é descrito o planejamento de testes para o EPS do satélite Aalto-2, assim como são relatados os resultados de testes executados em um modelo protótipo do mesmo.

O planejamento de testes descrito referenciou-se nas orientações do CDS e suas filosofias de teste. No momento da escrita do trabalho de Hemmo (2013), estavam previstos a fabricação de um modelo de engenharia para realização de testes funcionais e, posteriormente, a fabricação de um modelo de qualificação ou proto-flight para os testes de qualificação.

Os testes relatados no trabalho foram executados em um modelo protótipo nos estágios iniciais de desenvolvimento, sem o microcontrolador integrado ao módulo. Foram relatados os seguintes testes:

- a) Funcionamento dos conversores DC-DC;
- b) Eficiência do sistema de harvesting (conversores BCR);
- c) Testes dos circuitos de proteção;
- d) Testes de burn-in;

O funcionamento dos conversores DC-DC foi testado aplicando-se diferentes cargas (incrementalmente até atingirem-se os valores descritos nos requisitos do módulo) à saída e medindo-se tensões e correntes de entrada e saída a fim de obter-se a eficiência. Como os conversores possuem redundância, foram testados tanto individualmente quanto em funcionamento paralelo (redundância quente). Os resultados foram então comparados com os requisitos e também com as informações disponíveis nos datasheets dos conversores, visto que são componentes COTS.

O sistema de harvesting foi testado simulando-se o ponto de operação dos painéis solares com fontes de bancada e aplicando-se um reostato ao barramento das baterias. Foram medidas tensões e correntes à entrada e saída dos conversores BCR utilizados para realizar MPPT a fim de obter-se a eficiência. Os resultados foram então comparados com os requisitos.

Para proteção contra over-current é utilizado o componente MAX890L. Sua operação foi testada aplicando-se passagem de corrente ao componente de forma incremental até que o limite imposto fosse atingido.

O teste de burn-in consistiu em aplicar uma alta demanda de potência ao EPS por um longo período de tempo. Foram aplicadas cargas de 4.5W e 2.5W aos conversores de 5V e 3.3V, respectivamente, por um período de 7 dias. Após o teste, as características da placa foram medidas e comparadas com resultados anteriores.

2.4.2 ESTCube-1

No artigo de Pajusalu *et al.* (2014) são relatados os testes realizados para qualificação do EPS do satélite ESTCube-1. A filosofia de testes adotada foi de *proto-flight testing*, ou seja, o mesmo módulo utilizado nos testes de qualificação foi utilizado como modelo de voo. Um modelo de engenharia testes funcionais e de desenvolvimento, porém estes não foram descritos detalhadamente no artigo.

Foram relatados os seguintes testes:

- a) Vibração senoidal e aleatória;
- b) Choque mecânico;
- c) Ciclagem térmica;
- d) Termo vácuo;

Além disso, foram realizados testes de estresse dos principais componentes do módulo antes da montagem do EPS, incluindo testes de ciclagem térmica, ciclagem de carga e em vácuo das baterias utilizadas.

Foram medidas também a eficiência dos conversores utilizados, para diferentes tensões de entrada e diferentes cargas.

2.4.3 MIST

O trabalho de Barra (2019) descreve em detalhe os procedimentos de testes funcionais realizados no EPS do satélite MIST. Neste CubeSat, foram empregados módulos comerciais para toda a plataforma de serviço, inclusive para o EPS, utilizando o modelo NanoPower P31u (NANOPOWER P31U... , 2023) em conjunto com a placa de baterias BP4 (NANOPOWER BP4... , 2023), ambos fabricados pela GomSpace.

Os principais objetivos destes testes funcionais eram: verificar a análise de *power budget*, medir o Depth of Discharge (DoD) das baterias e verificar que a demanda de potência das cargas úteis não interfere no funcionamento do EPS.

Para a execução dos testes, foi desenvolvida uma plataforma de testes constituída por uma plataforma flat-sat, simuladores de painéis solares e simuladores de consumo das cargas úteis, todos estes desenvolvidos por estudantes que haviam participado do projeto anteriormente.

O planejamento dos testes foi feito seguindo as orientações da ECSS para testes (ECSS SECRETARIAT, 2022b). Os testes foram divididos em blocos, sendo o primeiro bloco com testes funcionais e os outros cinco blocos com testes de missão, simulando o consumo e tempo de acionamento de diferentes cargas úteis do satélite de acordo com a operação esperada.

A seguir estão listados, resumidamente, os principais testes executados no EPS do satélite MIST, assim como as medidas realizadas em cada teste:

- a) Funcionais:
 - Proteção de overcurrent dos barramentos;
 - Proteção contra overcharge e over discharge das baterias;
- b) Nenhuma payload ligada:
 - Cenários de melhor e pior caso;
 - Medidas de consumo do sistema, potência dos painéis, tensão e temperatura da bateria em cada cenário;
- c) Combinações de payloads ligadas:
 - Cenários de melhor e pior caso;
 - Medida de tensão e temperatura da bateria;
 - Medida da potência de saída dos barramentos;
- d) Fast Charge/Discharge da bateria:
 - Usado como referência do carregamento e descarregamento da bateria com as condições máximas suportadas pelo EPS;
 - Não é um cenário esperado durante a operação;

2.4.4 EPS 2.0

Encontra-se na documentação do EPS 2.0 (SPACELAB, 2023a) um capítulo descrevendo os procedimentos de teste a serem executados no módulo. Tem-se também documentados relatórios de testes feitos em modelos de engenharia deste EPS.

A documentação para a missão GOLDS-UFSC (SPACELAB, 2023b), na qual será utilizado este EPS, apresenta-se uma matriz de testes base a ser adaptada e executada para cada um dos módulos que compõem o satélite. Para cada módulo, testes mais específicos poderão ser acrescentados à matriz base, que é mostrada na Tabela 2. Os testes foram organizados em blocos, envolvendo uma série de inspeções, testes elétricos, funcionais.

As inspeções e testes descritos acima foram executados no modelo de engenharia do EPS 2.0, além disso, testes funcionais adicionais foram acrescentados e executados. Os resultados detalhados encontram-se no relatório presente nos Apêndices A e B da documentação do EPS 2.0 (SPACELAB, 2023a). Observando-se estes relatórios, identificam-se os seguintes testes:

Tabela 2 – Matriz de testes do EPS 2.0.

Tipo de Teste	Sub Testes	ID
A. Inspeção Visual	1. Verificação da qualidade da embalagem	TA1
	2. Qualidade da fabricação e montagem da placa	TA2
	3. Comparação com modelo 3D	TA3
	4. Marcadores de camada	TA4
	5. Rótulos (comparação com esquemático)	TA5
	6. Fotos de alta resolução para documentação	TA6
B. Inspeção Mecânica	1. Dimensões da placa e posição das furações	TB1
	2. Pesagem da placa	TB2
C. Inspeção de Integração	1. Verificar pinagem dos conectores	TC1
	2. Verificar posicionamento dos conectores	TC2
D. Inspeção Elétrica	1. Curtos nas soldas	TD1
	2. Componentes faltantes	TD2
	3. Pinos levantados	TD3
	4. Qualidade das soldas	TD4
	5. Componentes trocados	TD5
	6. <i>Partnumber</i> dos componentes	TD6
E. Testes Elétricos	1. Teste de continuidade	TE1
	2. Procedimentos de alimentação	TE2
	3. Medida de potência média de entrada consumida	TE3
	4. Medida de potência média à saída	TE4
	5. Temperatura das trilhas de potência	TE5
	6. Integridade dos sinais	TE6
F. Testes Funcionais	1. Executar código de teste simples	TF1
	2. Executar código do sistema	TF2
	3. Verificar <i>flags</i> de auto-teste de hardware do sistema	TF3
	4. Monitorar comportamento dos LEDs	TF4
	5. Monitorar os <i>logs</i> da porta serial de <i>debug</i>	TF5
G. Testes de Módulo	1. Revisar comportamento operacional	TG1
	2. Revisar cumprimento de requisitos e funcionalidades	TG2
	3. Revisar configuração e protocolo dos barramentos de comunicação	TG3
	4. Revisar pacotes de dados, barramentos de potência e sinais de controle	TG4
	5. Revisar casos críticos e avaliar danos	TG5
	6. Executar testes de código automatizados	TG6
	7. Rodar códigos de teste do sistema	TG7
	8. Executar o código estável mais recente e revisar o comportamento	TG8

Fonte: Adaptado de SpaceLab (2023b).

- a) Inspeções:
 - Visual;
 - Mecânica;
 - Elétrica;
 - De integração;
- b) Testes elétricos:
 - Teste dos conversores;
- c) Testes funcionais:
 - Gravação do firmware;
 - Barramentos de comunicação;
 - Leitura dos sensores;
 - Funcionamento do monitor de baterias (DS2777G+);
 - Controle dos aquecedores de bateria;
 - Funcionamento do algoritmo de MPPT;

Para todos os testes, o EPS foi alimentado por uma fonte de bancada, através de uma flat sat.

As inspeções visam verificar a qualidade do processo de fabricação, conformidade com os arquivos de projeto e integridade mecânica e elétrica do módulo.

Os testes dos conversores foram realizados aplicando-se diferentes cargas à saída de cada barramento do EPS, avaliando-se a ocorrência de quedas de tensão ou outras anomalias.

A versão mais recente do firmware foi gravada ao MSP430 e o funcionamento foi aferido através dos logs enviados ao computador via UART.

Os principais barramentos de comunicação, com o OBDH via I²C e com o TT&C via UART, foram testados utilizando-se um analisador lógico e verificando a integridade dos pacotes enviados.

A leitura dos sensores foi verificada comparando-se as medidas reportadas nos logs do EPS com medidas realizadas por instrumentos de medição externos.

O funcionamento do monitor de baterias foi verificado através da leitura dos registradores internos do CI, comparando-se com os valores e configurações esperados.

Para o teste do controle dos aquecedores de bateria, seus limiares máximo e mínimo de temperatura foram alterados para valores acima da temperatura ambiente (32°C e 26°C, respectivamente), e as leituras dos sensores de temperatura foram monitoradas durante um período de tempo.

O algoritmo de P&O para o MPPT foi testado com testes unitários no firmware. O sinal de Pulse Width Modulation (PWM) gerado pelo microcontrolador e utilizado

para controle dos conversores boost que realizam o MPPT foi avaliado utilizando-se um osciloscópio.

3 METODOLOGIA

Com o intuito de propor uma estrutura organizada e completa para o plano de testes, as normas e padrões da ECSS serão tomados como referencial. Será feita uma análise mais detalhada dos documentos referentes a testes (ECSS SECRETARIAT, 2022b) e verificação (ECSS SECRETARIAT, 2018), identificando-se os aspectos principais e de maior relevância considerando o cenário de uma missão universitária.

A fim de propor uma matriz de testes base, adaptável a diferentes módulos, as topologias e arquiteturas de EPS apresentadas, bem como as campanhas de testes de missões prévias, serão analisadas e consideradas. Identificando-se os diferentes aspectos e funcionalidades, assim como os diferentes testes executados, blocos de testes mais completos poderão ser propostos.

A participação em projetos como FloripaSat-1, GOLDS-UFSC e Constelação Catarina, os anos de experiência no desenvolvimento e testes de módulos EPS, bem como o convívio diário com professores e colegas de laboratório no ambiente do SpaceLab agregam um conhecimento prévio significativo acerca dos aspectos e do cenário do desenvolvimento de missões espaciais universitárias. As considerações e adaptações adotadas acerca da aplicabilidade de certos aspectos das normas são resultado destas experiências.

4 DESENVOLVIMENTO

Conforme ECSS Secretariat (2022b), o plano de testes é desenvolvido de acordo com o plano de verificação, que define quais dos requisitos relacionados ao produto serão testados. O termo produto se refere ao item para o qual a norma está sendo aplicada. A partir do plano de testes, documentos complementares são gerados, relacionados à especificação dos testes, procedimentos de teste e por fim relatórios de teste.

Além dos conceitos apresentados na Seção 2.2, estas normas contem uma série de definições e requisitos relacionados aos testes, além de linhas de base de testes a serem adotadas. Para sua utilização é feito um processo de adequação, também chamado de tailoring, para cada produto, no caso deste trabalho, o EPS.

Este processo de adequação inicia-se a partir de definições iniciais acerca do tipo de produto a qual o plano se aplicará e do tipo de modelos a serem utilizados, para então adaptarem-se as linha de base de testes e elaborar o plano de testes.

O documento de diretrizes proposto neste trabalho consistirá de um documento contendo um conjunto de orientações e direcionamentos, detalhando os principais aspectos e considerações relevantes acerca da adaptação destas normas para módulos EPS de forma que, a partir dele, possa-se elaborar planos de teste para diferentes topologias e arquiteturas de EPS.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com ECSS Secretariat (2018), o processo de verificação é dividido em níveis de decomposição do sistema (*verification levels*). Para cada nível, a verificação é feita múltiplos estágios (*verification stages*), com objetivos específicos. Testes se enquadram como um dos métodos utilizados dentro deste processo, inclusive sendo considerado o método que traz maior confiabilidade (ECSS SECRETARIAT, 2018).

Desta forma, um plano de testes deve considerar o nível e estágio do processo de verificação no qual ele será executado. Além disso, devem ser definidos os tipos de modelos físicos *model philosophy* a serem utilizados nos testes. O estágio de verificação, bem como o tipo de modelo adotado, definirão o objetivo principal do plano de testes elaborado.

A partir destas considerações, uma análise deve ser feita de modo que estes conceitos possam ser adaptados e aplicados a um módulo EPS para CubeSats.

4.1.1 Nível de Verificação

O nível de verificação (*verification level*) está relacionado com a decomposição do sistema em diferentes níveis nos quais o processo de verificação é executado. Na tabela do apêndice B.1 de ECSS-S-ST-00-01 (ECSS SECRETARIAT, 2023) mostra as divisões típicas, com exemplos.

Em ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b), tratam-se dos testes para os níveis de *space segment element* e *space segment equipment*. O nível de *space segment subsystem*, intermediário à estes, não é coberto nesta norma, de fato, é mencionado que para este nível, normalmente executam-se apenas testes funcionais.

Num primeiro momento, devido às nomenclaturas utilizadas e aos exemplos da tabela menciona, parece intuitivo atribuir os subsistemas de um CubeSat, e portanto o EPS, ao nível de *space segment subsystem*, porém uma análise mais minuciosa é necessária.

Primeiramente, visto que a plataforma de serviço é o principal foco de desenvolvimento do SpaceLab, é de grande interesse que sejam aplicados testes mais completos aos seus módulos, além de apenas testes funcionais básicos. Além disso, analisando as definições presentes nas próprias normas da ECSS, pode-se fazer argumento para a aplicação dos testes voltados para *space segment element* aos módulos de serviço de CubeSat, mais especificamente, neste trabalho, aoEPS.

Como visto na Seção 2.1, os módulos de serviço são responsáveis pelas funções fundamentais do nano satélite, e estão diretamente relacionados com o cumprimento de seus objetivos. Observando a definição para o termo *element*, nota-se que este está relacionado justamente com o cumprimento de um subconjunto dos objetivos do satélite.

element: combination of integrated equipment, components and parts. An element fulfils a major, self-contained, subset of a segment's objectives. (ECSS SECRETARIAT, 2023, p. 9).

.

Além disso, nas próprias normas o termo *service module* (módulo de serviço) é mencionado com *element*. De fato, é mencionado tanto em ECSS Secretariat (2023) quanto em ECSS Secretariat (2022b) que um elemento pode ser dividido em dois ou mais elementos.

A space segment element can be composed of several space segment elements, e.g. a spacecraft is composed of instruments, a payload module and a service module. (ECSS SECRETARIAT, 2023, p. 10)

.

Outro ponto importante, esta divisão proposta nas normas está no contexto de um satélite de médio ou grande porte, com sistemas de complexidade muito maiores que um CubeSat, portanto, uma decomposição mais granulada dos sistemas é adequada neste aspecto. Mesmo neste cenário, em ECSS Secretariat (2010), é mencionado a possibilidade de não se utilizar o nível de subsistema como forma de redução de custos.

Com isto, neste trabalho serão consideradas as recomendações da norma ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b) relacionadas à *space segment element*.

4.2 DOCUMENTAÇÃO

Em relação à documentação relacionada ao processo de testes, a norma ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b) define quatro tipos de documentos a serem gerados, sendo eles: plano de teste (*AIT Plan*), especificação de teste (*Test Specification*), procedimento de teste (*Test Procedure*) e relatório de teste (*Test Report*). As especificações detalhadas e requisitos acerca do conteúdo esperado de cada um destes documentos podem ser encontrados nos apêndices das normas ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b) e ECSS-E-ST-10-02 (ECSS SECRETARIAT, 2018), a seguir será apresentada uma breve contextualização acerca do propósito de cada documento e por fim, considerações acerca da aplicação desta estrutura de documentação ao contexto deste trabalho.

O plano de teste (*AIT plan*) descreve todo o processo de testes, relacionando os testes planejados com os requisitos sendo verificados. Ele contém o planejamento de atividades, matrizes de teste conectando os requisitos aos testes que os verificam, descrição dos equipamentos e instalações necessárias, documentação a ser produzida, bem como organização e cronograma.

O documento de especificação de teste (*Test Specification*) descreve em detalhes os requisitos e especificações do teste. Ele define o propósito do teste, a abordagem utilizada, o item testado, os equipamentos utilizados, instrumentação e incertezas, condições do teste e tolerâncias, critérios de avaliação (sucesso e falha), documentação relacionada e cronograma.

O documento de procedimentos de teste (*Test Procedure*) descreve os direcionamentos necessários para a execução do teste. Neste documento são descritos os objetivos do teste, referência ao documento de especificação de teste correspondente, configuração do item testado, equipamentos necessários e instruções passo a passo para a execução do teste.

Em casos de testes mais simples, os documentos de especificação e procedimento de teste podem ser combinados em um único documento. Em testes mais complexos, múltiplos documentos de procedimento de teste podem originar de um único documento de especificação. Ainda, sobreposições de informação entre estes documentos devem ser minimizados, o foco do documento de especificação está na definição e requisitos do teste, enquanto que o documento de procedimentos tem foco operacional, com instruções passo a passo.

O relatório de teste (*Test Report*) descreve a execução do teste, os resultados, bem como avaliação e conclusões acerca dos requisitos do teste e critérios de avaliação.

Em relação à aplicabilidade deste tipo de documentação, algumas considerações podem ser feitas. Primeiramente, ressalta-se que as definições destes documentos visam abranger testes altamente complexos para satélites de grande porte. Outro ponto é que, seguindo à risca estas definições, uma grande quantidade de comentários é gerada, especialmente documentos de especificação e procedimentos de teste, visto que, a princípio, seriam

gerados ao menos um conjunto destes documentos para cada teste.

Em uma missão de CubeSat, devido a simplicidade de projeto e também dos testes executados em relação à satélites de grande porte, bem como a proposta de baixo custo e rápido desenvolvimento, e especialmente considerando que neste trabalho o foco está em apenas um dos módulos do satélite, é possível simplificar e agrupar boa parte destes documentos.

Com isto em mente, é proposto que estes documentos sejam unificados e adaptados ao estilo de documentação de cada projeto. No caso do SpaceLab, por exemplo, cada módulo possui um único documento descrevendo todas as características do mesmo, e incluindo também um planejamento de testes e relatórios de testes neste mesmo documento. Portanto, neste caso uma opção seria agrupar os quatro documentos em um único exemplar, e possivelmente anexa-lo ao documento principal do módulo. Em projetos com múltiplos documentos, poderia-se manter documentos separados, mas agrupar cada tipo de documento em um único exemplar, por exemplo, agrupar todas as especificações de teste em um único documento de especificação.

4.2.1 Estrutura do Plano de Testes

As definições das normas com relação ao documento de plano de teste (*AIT Plan*) referem-se ao conteúdo esperado para o documento, mas não especifica diretamente a estrutura e organização deste documento. Além disso, como mencionado acima, estas definições são passíveis de adaptação para o contexto de um módulo de CubeSat. Sendo assim, a seguinte organização é proposta como ponto de partida para a elaboração do plano de testes:

- a) introdução:
 - contendo uma descrição dos objetivos e conteúdo do documento;
- b) apresentação do produto:
 - contendo a descrição dos modelos físicos a serem utilizados e seu estado de desenvolvimento;
- c) requisitos em verificação:
 - contendo a listagem dos requisitos do módulo que serão verificados com a execução do plano de testes;
- d) programa de testes:
 - contendo o planejamento e matriz de testes, referenciando cada teste com suas especificações, procedimentos e modelo utilizado;
 - descrição dos blocos e atividades de teste;
 - descrição do sequenciamento das atividades;
- e) equipamentos e instalações:

- contendo uma relação dos equipamentos necessários e instalações a serem utilizadas;
- f) documentação:
 - contendo uma descrição dos documentos a serem gerados e seus conteúdos;
- g) cronograma:
 - caso o plano de testes tenha o intuito de ser recorrente, o cronograma não é necessário;

Vale ressaltar que a estrutura acima é proposta como sugestão ou ponto de partida, e deve ser adaptada às necessidades e ao estilo de documentação de cada projeto.

4.3 OBJETIVOS DO PLANO DE TESTES

Considerando o estágio de verificação e tipo de modelo adotado, o plano de testes é definido com um dos três objetivos principais: *qualification testing*, *acceptance testing*, *proto-flight testing*. A descrição e finalidade de cada objetivo foi apresentada na Seção 2.2.

A principal consequência de um determinado objetivo está na seleção dos testes a serem executados a partir das matrizes de teste base, e principalmente na intensidade e duração dos testes.

De fato, no documento ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b), são apresentadas matrizes ou linhas de base de teste para cada objetivo, sendo que a diferença entre cada uma está na definição de quais testes são considerados como requeridos ou opcionais. Em relação à intensidade e duração dos testes, são apresentadas tabelas com os dados específicos para cada objetivo.

Em relação às intensidades e durações, serão referenciadas estas tabelas diretamente no documento de diretrizes quando necessário.

4.4 LINHA DE BASE DE TESTES

As linhas de base de testes apresentadas em ECSS Secretariat (2022b), assim como o restante da norma, foram elaboradas de forma bastante abrangente e direcionadas à satélites de grande porte. Sendo assim, considerando a simplicidade de projeto de um CubeSat e o contexto de uma missão universitária, uma versão adaptada destas matrizes de base será adotada.

De fato, será proposta uma única matriz para os três diferentes objetivos, porém esta será elaborada de forma a abranger diferentes topologias e arquiteturas. Ainda, visto que o documento de diretrizes é voltado diretamente para módulos EPS, é possível propor testes mais específicos, especialmente no caso de testes funcionais e de missão, proporcionando um maior direcionamento em relação as matrizes base.

Com isso, a partir das linhas de base de testes apresentadas na norma ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b), considerou-se que a matriz de testes a ser proposta deve conter os seguintes testes:

- a) testes funcionais;
- b) testes de performance;
- c) testes de missão;
- d) propriedades físicas;
- e) vibração;
- f) termo vácuo.

Para os testes de propriedades físicas, vibração e termo vácuo (testes mecânicos), os requisitos de intensidade e duração, bem como detalhes acerca da especificação destes testes podem ser referenciados diretamente das seções 6.5.2 e 6.5.4, e das tabelas 6-2, 6-4 e 6-6 da norma ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b).

Em relação aos testes funcionais, de performance e de missão, apenas uma visão geral da finalidade de cada um destes testes é apresentada, visto que estes tipos de teste são bastante específicos ao produto sendo testado e à própria missão, e devem ser especificados caso a caso.

O documento de diretrizes tem o intuito de ser aplicável às diferentes implementações de módulos, sendo assim, os testes funcionais, de performance e de missão devem levar em consideração as diferentes possibilidades. No Capítulo 2, foram apresentadas diversas topologias e arquiteturas de EPSs, bem como campanhas de testes destes módulos, que serão analisadas a fim de propor uma matriz de testes mais abrangente.

4.5 TESTES FUNCIONAIS, DE PERFORMANCE E DE MISSÃO

Conforme apresentados na norma ECSS-E-ST-10-03 (ECSS SECRETARIAT, 2022b), os testes funcionais, de performance e de missão tem as seguintes finalidades:

- a) testes funcionais tem a finalidade de verificar que o produto apresenta o funcionamento adequado de acordo com as suas especificações e requisitos em todos os seus modos de operação:
 - pode-se ainda dividir-se em testes funcionais mecânicos e elétricos;
- b) testes de performance tem a finalidade de verificar que o produto apresenta a performance adequada na execução de suas funções de acordo com as suas especificações e requisitos;
- c) testes de missão tem a finalidade de simular casos de missão esperados, em cenários nominais e críticos, durante a operação da missão, dentro do que se pode similar em terra:

- casos de missão referem-se a situações e eventos esperados durante a missão, bem como a operação nominal de acordo com o planejamento da missão.

Com isso em mente, analisando as topologias e arquiteturas de diferentes projetos, apresentadas na Seção 2.3, identificou-se um conjunto de características presentes nos diferentes designs relacionadas à funcionalidades de um módulo EPS:

- a) múltiplos estágios de conversão:
 - os módulos possuem reguladores em diversos pontos da distribuição de energia: nas interfaces com os painéis solares, para regulagem de carga da bateria e para os barramentos de saída;
- b) controle dos barramentos:
 - os barramentos de saída costumam ter chaves de potência possibilitando controle individual;
 - pode-se ter também o controle via pinos de *enable* dos próprios reguladores;
- c) circuitos de proteção;
 - estas mesmas chaves de potência costumam possuir limitação de corrente como proteção;
 - os módulos podem possuir também circuitos de proteção para as baterias, utilizando chaves para controle das direções de carga e descarga;
- d) aquecimento de baterias;
 - o sistema de aquecimento normalmente é feito através de resistores de potência;
- e) monitoramento;
 - sensores de tensão e corrente são empregados nos barramentos principais e em diversos pontos de interesse;
 - sensores de temperatura também são utilizados, especialmente nas baterias;
- f) presença de microcontrolador;
 - microcontroladores são utilizados para comunicação, leitura dos sensores e gerenciamento de dados;
 - em alguns casos, são utilizados também para execução de algoritmos, como P&O para controle do MPPT;
 - podem executar também funções operacionais da missão, como inicialização do satélite e controle dos modos de operação.

Todo conjunto de características servirá de base para os testes funcionais propostos na matriz do documento de diretrizes, de forma que, ao ser elaborado um plano de testes específico, possam ser selecionados os testes funcionais relevantes para uma dada arquitetura.

Como base para os testes de performance e de missão, convém analisar-se as campanhas de testes de módulos EPS apresentadas na Seção 2.4. Na Tabela 3, tem-se uma visão geral dos principais tipos de testes executados nos módulos em cada campanha de testes apresentada. Uma descrição mais detalhada sobre os testes em cada módulo encontra-se na seção menciona acima.

Tabela 3 – Tipos de testes executados em campanha de testes de EPSs

EPS	Testes					
	Inspeções	Funcionais	Eficiência	Missão	Estresse	Ambiente
Aalto-2	-	X	X	-	-	-
ESTCube-1	-	X	X	-	X	X
MIST	-	X	X	X	-	-
EPS 2.0	X	X	-	-	-	-

Aqui, inspeções referem-se principalmente em inspecionar visualmente as condições de fabricação e transporte dos módulos, físicos utilizados. Testes de ambiente referem-se aos testes de vibração, termo vácuo, choque mecânico, entre outros, ou seja, testes relacionados às condições do ambiente espacial e do lançamento. Testes de estresse referem-se a submeter os componentes aos seus limites máximos e também testes como o burn-in. Os testes de eficiência referem-se principalmente à eficiência dos diversos conversores presentes nos módulos.

Testes classificados como funcionais envolvem teste dos conversores com as cargas esperadas, testes de comunicação, leitura de sensores, funções do microcontrolador, funcionamento de algoritmos, entre outros.

Como pode ser visto, dentre os módulos analisado, um grande foco é dado para testes funcionais, principalmente para o funcionamento dos conversores e circuitos de proteção, porém, apenas no EPS 2.0 foram relatados testes funcionais além destes. Nota-se também que em nenhuma campanha foram realizados testes de todos os tipos listados.

Os testes de eficiência dos conversores são o principal interesse relacionado à performance nos EPSs. Em alguns casos, tem-se inclusive requisitos específicos relacionados à eficiência, como em Hemmo (2013) em que foi dado um grande foco em testes de eficiência de conversores.

Em relação aos testes de missão, apenas em Barra (2019) foram relatados simulações de diferentes cenários esperados. Neste caso, foram simulados o funcionamento das diferente cargas úteis do satélite, em termos de tempo de acionamento e consumo, conforme a operação planejada e em diferentes cenários.

4.6 MATRIZ DE TESTES BASE

Com base nas análises das diferentes topologias e arquiteturas, bem como das campanhas de testes e também das normas da ECSS, é proposta a matriz de testes

Tabela 4 – Matriz de testes base

Test Block	Test Activity
Inspeções	Inspeção de Fabricação
	Inspeção Elétrica
	Inspeção Mecânica
	Inspeção de Integração
Funcionais	Sistema de <i>harvesting</i>
	Reguladores dos canais de saída
	Gerenciamento das baterias
	Controle dos canais de saída
	Circuitos de proteção
	Leitura de sensores
Performance	Barramentos de comunicação
	Consumo de potência do módulo
	Eficiência do regulador do sistema de <i>harvesting</i>
	Eficiência dos reguladores dos canais de saída
	Eficiência do regulador de carga das baterias
Missão	Eficiência do sistema
	Casos de missão
Ambientais	Vibração
	Termo vácuo
	Ciclagem térmica
	Bake-out

Fonte: Elaborado pelo autor.

mostrada na Tabela 4 com linha de base.

A matriz está organizada em blocos teste, sendo estes: integração, testes funcionais, testes de performance, testes de missão e testes ambientais. Cada bloco é composto por um conjunto de atividades de testes relacionadas, por fim, cada atividade é composta por um conjunto de testes individuais. Ainda, a matriz deve relacionar cada teste individual com suas respectivas especificações, procedimentos, modelo físico utilizado e requisitos sendo verificados, de forma que, no plano de testes específico, esta matriz apresentaria colunas adicionais relacionadas a estes pontos, podendo inclusive ser dividida em múltiplas matrizes para melhor organização. Desta forma, testes relacionados podem ser agrupados e executados de maneira organizada.

A nível de testes individuais, a dependência da arquitetura específica do módulo alvo dos testes aumenta significativamente, tornando inviável a proposta de testes individuais que possam abranger diferentes arquiteturas. Com isso, limitou-se ao nível de atividades de teste para a matriz proposta.

Ressalta-se também que esta matriz é proposta como uma linha de base, e testes adicionais específicos a uma determinada arquitetura, não cobertos na matriz base, podem ser adicionados conforme necessário.

O bloco de inspeção tem como finalidade verificar a integridade do processo de fabricação e conformidade do modelo físico em relação aos arquivos de projeto, garantindo

que não hajam defeitos de fabricação nos modelos testados. Este bloco é composto pelas seguintes atividades:

- a) inspeção de fabricação:
 - tem a finalidade de verificar a integridade do processo de fabricação e transporte;
 - consiste de inspeções visuais das condições de embalagem e transporte, bem como conformidade com requisitos do processo de fabricação;
- b) inspeção elétrica:
 - tem a finalidade de verificar a integridade elétrica do módulo;
 - consiste de verificar conformidade em relação aos esquemáticos, qualidade das soldas, ausência de curto circuitos e alimentar o módulo pela primeira vez;
- c) inspeção mecânica:
 - tem a finalidade de verificar as propriedades físicas em relação aos arquivos de projeto;
 - consiste na medição das dimensões da placa, massa, posição e tamanho das furações (*mounting holes*);
- d) inspeção de integração:
 - tem a finalidade de verificar que o módulo pode ser fisicamente integrado ao satélite;
 - consiste em verificar a pinagem e posição de conectores em relação aos esquemáticos;

O bloco de testes funcionais tem como finalidade verificar que o módulo é capaz de executar todas as suas funções requeridas. Este bloco é composto pelas seguintes atividades:

- a) sistema de harvesting:
 - tem a finalidade de verificar o funcionamento do sistema de harvesting do módulo;
 - consiste em teste dos conversores utilizados, bem como o funcionamento de sistemas de MPPT e algoritmos relacionados;
- b) canais de saída:
 - tem a finalidade de verificar o funcionamento dos conversores dos barramentos de saída do módulo;
 - consiste na aplicação de cargas aos conversores, conforme os limites esperados durante a operação da missão;

- c) gerenciamento das baterias:
 - tem a finalidade de verificar o funcionamento do sistema de gerenciamento e monitoramento da bateria;
 - consiste no teste de reguladores de carga, funcionamento de sistemas de monitoramento, testes do sistema de aquecimento e algoritmos de controle relacionados;
- d) controle dos canais de saída:
 - tem a finalidade de verificar o funcionamento do sistema de controle dos barramentos de saída;
 - consiste em testes das chaves de potências dos barramentos e funcionamento dos pinos de *enable* dos conversores;
- e) circuitos de proteção:
 - tem a finalidade de verificar o funcionamento dos circuitos de proteção presentes no módulo;
 - consiste no teste da limitação de corrente de chaves de potência, controle de carga e descarga das baterias e algoritmos relacionados;
- f) leitura de sensores:
 - tem a finalidade de verificar o funcionamento e a leitura correta dos sensores presentes no módulo;
 - consiste no testes e comparação das leituras dos sensores do módulo com instrumentos de medição;
- g) barramentos de comunicação:
 - tem a finalidade de verificar a integridade e correta operação dos barramentos de comunicação do módulo;
 - consiste em testes dos sistemas de comunicação tanto com outros módulos do satélite quanto com periféricos do próprio módulo, verificar a integridade dos sinais e da informação transmitida.

O bloco de testes de performance tem como finalidade de verificar que a performance do módulo na execução de suas funções está de acordo com os requisitos. O grande foco deste bloco está em verificar a eficiência dos diversos estágios de conversão presentes no EPS, o que costuma ser feito aplicando-se cargas incrementais aos reguladores, obtendo-se a eficiência para diversos pontos de operação. Este bloco é composto pelas seguintes atividades:

- a) consumo de potência:
 - tem a finalidade de verificar o consumo de potência do módulo isoladamente;

- consiste na medição do consumo do módulo em condições normais de operação, sem cargas conectadas.
- b) eficiência do sistema de harvesting:
 - tem a finalidade de verificar a eficiência dos reguladores utilizados no sistema de harvesting;
- c) eficiência dos conversores de saída:
 - tem a finalidade de verificar a eficiência dos reguladores utilizados nos barramentos de saída do módulo;
- d) eficiência dos reguladores de carga das baterias:
 - tem a finalidade de verificar a eficiência dos reguladores utilizados na interface com as baterias;
- e) eficiência do sistema:
 - tem a finalidade de verificar a eficiência do sistema como um todo;

O bloco de testes de missão tem como finalidade verificar a operação correta do módulo em relação ao conceito de operação da missão. As atividades de teste deste envolverão a simulação, dentro do que é factível em terra, de cenários esperados durante a operação do módulo, em concordância com o conceito de operações da missão. Incluem-se também simulações cenários críticos e situações adversas, bem como casos com requisitos de tempo críticos (*time critical*). No caso deste bloco, mesmo a nível de atividades de teste, há uma grande dependência em relação à missão e aos objetivos específicos de cada implementação, portanto não serão propostas atividades ou casos específicos neste momento.

O bloco de testes ambientais tem a finalidade de verificar que o módulo é capaz de sobreviver e operar nas condições ambientais em que será submetido. As atividades envolvem testes de vibração, que remetem às condições durante o lançamento, e termo vácuo, que remete ao ambiente espacial.

4.7 REQUISITOS GERAIS

As normas da ECSS apresentam também requisitos relacionados à testes de forma geral, que independem do produto para qual está sendo realizado o tailoring. Estes requisitos abordam condições de teste, tolerâncias, incertezas de medição, bem como revisões. Nestes casos, quando necessário, serão referenciadas as normas no documento de diretrizes diretamente, visto que não há considerações específicas a serem feitas em relação ao EPS.

Em relação as revisões, são definidas uma série de revisões formais a serem feitas antes e após cada teste. No contexto de uma missão de CubeSat, a realização de tantas revisões acarretaria num grande aumento no tempo de cumprimento da missão e também

ao custo do projeto, especialmente se aplicadas ao nível de testes de um único módulo. Sendo assim, neste momento, estas revisões não foram consideradas aplicáveis.

5 PLANO DE TESTES BASE

Com base nos estudos e análises realizadas, foi elaborado um documento, nomeado *EPS Test Plan Guidelines* contendo diretrizes e recomendações acerca da elaboração de planos de teste para módulos EPS no contexto de missões de CubeSats.

Visto que a utilização primária será para os módulos desenvolvidos no SpaceLab, e também motivação da realização do trabalho veio das experiências adquiridas na participação dos projetos do laboratório, foi utilizado o modelo e estilo de documentação utilizados no SpaceLab, no idioma Inglês. No Apêndice A pode ser encontrada a primeira versão deste documento.

O documento foi estruturado da seguinte maneira. . .

6 ESTUDO DE CASO - EPS 2.0

A partir das diretrizes e orientações do documento *EPS Test Plan Guidelines*, um plano de testes para o módulo EPS 2.0, desenvolvido no SpaceLab, foi elaborado. No Apêndice B pode ser encontrada a primeira versão deste documento.

O documento foi estruturado da seguinte maneira. . .

7 CONCLUSÃO

As conclusões devem responder às questões da pesquisa, em relação aos objetivos e às hipóteses. Devem ser breves, podendo apresentar recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

BARRA, Stefano. **Functional Testing of the Electrical Power System of the MIST Satellite**. [S.l.: s.n.], 2019.

BOUWMEESTER, J.; GUO, J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. **Acta Astronautica**, v. 67, n. 7, p. 854–862, 2010. ISSN 0094-5765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576510001955>.

CAPPELLETTI, Chantal; BATTISTINI, Simone; MALPHRUS, Benjamin. **CubeSat Handbook: From Mission Design to Operations**. [S.l.]: Academic Press, set. 2020. ISBN 0128178841.

CHO, M. *et al.* Overview of Nano-satellite Environmental Tests Standardization Project: Test Campaign and Standard Draft. **Nanosatellite Symposium**, out. 2012.

CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY. **CubeSat Design Specification**. San Luis Obispo, fev. 2022.

ECSS SECRETARIAT. **ECSS-E-HB-10-02 - Verification guidelines**. [S.l.], dez. 2010.

_____. **ECSS-E-HB-10-03 - Testing guidelines**. [S.l.], mai. 2022.

_____. **ECSS-E-ST-10-02 - Verification**. [S.l.], fev. 2018.

_____. **ECSS-E-ST-10-03 - Testing**. [S.l.], mai. 2022.

_____. **ECSS-S-ST-00-01 - Glossary of terms**. [S.l.], out. 2023.

EDPUGANTI, Amarendra *et al.* A Comprehensive Review on CubeSat Electrical Power System Architectures. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 37, n. 3, p. 3161–3177, mar. 2022. ISSN 1941-0107. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3110002.

GOMSPACE. **NanoPower BP4**: Datasheet - High Capacity battery pack for nano-satellites featuring four Li-Ion cells. [S.l.], set. 2023.

_____. **NanoPower P31u**: Datasheet - Electrical Power System for mission critical space applications with limited resources. [S.l.], set. 2023.

HEMMO, Jussi. **Electrical Power Systems for Finnish Nanosatellites**. 2013. Diss. (Mestrado) – Aalto University.

KESSLER SLONGO, Leonardo *et al.* Nanosatellite electrical power system architectures: Models, simulations, and tests. **International Journal of Circuit Theory and Applications**, v. 48, n. 12, p. 2153–2189, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1002/cta.2872>. eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cta.2872>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cta.2872>.

LANGER, M.; BOUWMEESTER, J. Reliability of CubeSats – Statistical Data, Developers’ Beliefs and the Way Forward. **30th Annual AIAA/USU Conference**, mar. 2016.

MARCELINO, Gabriel Mariano *et al.* FloripaSat-2: An Open-Source Platform for CubeSats. **IEEE Embedded Systems Letters**, p. 1–1, mar. 2023. ISSN 1943-0671. DOI: 10.1109/LES.2023.3260066.

MARIANO, Marcelino Gabriel *et al.* Qualification and validation test methodology of the open-source CubeSat FloripaSat-I. **Journal of Systems Engineering and Electronics**, v. 31, n. 6, p. 1230–1244, dez. 2020. ISSN 1004-4132. DOI: 10.23919/JSEE.2020.000103.

MONTEIRO, João P. *et al.* Integration and Verification Approach of ISTSat-1 CubeSat. **Aerospace**, v. 6, p. 131, 2019. ISSN 2226-4310. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace6120131>.

NASA. **The Artemis Plan - NASA’s Lunar Exploration Program Overview**. [S.l.], set. 2020.

PAJUSALU, Mihkel *et al.* Design and pre-flight testing of the electrical power system for the ESTCube-1 nanosatellite. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**, Teaduste Akadeemia Kirjastus (Estonian Academy Publishers), v. 63, n. 2, p. 232, 2014.

SPACELAB UFSC – SPACE TECHNOLOGY RESEARCH LABORATORY. **EPS 2.0 Documentation**. [S.l.], abr. 2023. Disponível em: <https://github.com/spacelab-ufsc/eps2>.

_____. **GOLDS-UFSC Design and Mission Overview**. [S.l.], jun. 2023. Disponível em: <https://github.com/spacelab-ufsc/floripasat2-doc>.

_____. **RE²PS GitHub Repository**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://github.com/spacelab-ufsc/eps-re>.

SWARTWOUT, Michael. The first one hundred cubesats: A statistical look. **Journal of small Satellites**, v. 2, n. 2, p. 213–233, 2013.

SWEETING, Martin N. Modern Small Satellites-Changing the Economics of Space. **Proceedings of the IEEE**, v. 106, n. 3, p. 343–361, 2018. ISSN 1558-2256. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2806218.

TISEO, B *et al.* Tailoring of ECSS standard for space qualification test of CubeSat nano-satellite. **International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering**, v. 13, n. 4, p. 295–302, 2019.

APÊNDICE A – PLANO DE TESTES BASE

A seguir é apresentada a primeira versão do plano de testes base desenvolvido neste trabalho.



EPS Test Plan Guidelines

EPS Test Plan Guidelines

SpaceLab, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - Brazil

EPS Test Plan Guidelines

February, 2024

Project Chief:
Eduardo Augusto Bezerra

Authors:
Ramon de Araujo Borba

Contributing Authors:

Revision Control:

Version	Author	Changes	Date
0.1	R.A. Borba	Document creation	2024/02/14



© 2024 by SpaceLab. EPS Test Plan Guidelines. This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

List of Tables

5.1 Baseline test matrix 9

Contents

List of Tables	v
1 Introduction	1
2 Documentation	3
2.1 Test Plan Structure	4
3 Test Objectives	5
3.1 Qualification Testing	5
3.2 Acceptance Testing	5
3.3 Proto-flight Testing	5
4 General Requirements	7
5 Baseline Test Matrix	9
5.1 Inspection	10
5.2 Functional	11
5.3 Performance	12
5.4 Mission	12
5.5 Environmental	13
References	15

CHAPTER 1

Introduction

This document contains a series of guidelines and recommendations regarding the preparation of test plans for CubeSat Electrical Power Systems.

This guidelines are based on the ECSS Standards ECSS-E-ST-10-02 [1] and ECSS-E-ST-10-03 [2] and are intended to be applicable to different EPS topologies and architectures.

An important consideration regarding the ECSS standards is that they were designed with for large scale missions and satellites of large sizes, and many of the requirements defined are not feasible for small scale CubeSat missions, with limited resources and development time, and especially when applying for a single module. The guidelines in this documents are an adaptation of the requirements defined in the standards, considering the scenario of a CubeSat mission.

Testing is considered part of the verification process outlined in the standards, this means that many of the concepts and considerations presented in this guidelines are derived from concepts related to this process. With this in mind, a basic review of the verification process main concepts is advised before implementing the test plan.

This document will cover: test plan structure, test objectives, associated documentation, general requirements and provide a baseline test matrix.

CHAPTER 2

Documentation

Regarding the documentation associated with testing, the standards define four types of documents: AIT (Assembly, Integration and Test) Plan, Test Specification, Test Procedure and Test Report. The expected content for each of these documents are defined in the appendices of the ECSS-E-ST-10-02 [1] and ECSS-E-ST-10-03 [2] documents. A description of the main purpose of these documents, as defined in the standards, is presented in the following paragraphs.

The AIT Plan document, which may also be named Test Plan, describes the entire testing process, linking each test with the requirement it verifies. It contains a planning and description of test activities, description of the selected models, test matrices linking tests with the corresponding test specification, procedure, report and model to be used, description of required equipment and facilities, documentation to be produced and schedule.

The Test Specification document describes the detailed specifications and requirements for the test. It contains a description of the purpose of the test, test approach, the item under test, the requirements being verified, required equipment, instrumentation and uncertainties, test conditions and tolerances, pass/fail criteria, related documentation and schedule.

The Test Procedure document describes the detailed procedures for execution of the test. It contains the objective of the test, reference to corresponding TSPE document, description of the item under test configuration, required equipment and detailed step-by-step instructions for the test execution.

The Test Report document describes the execution of the test, the test results, data analysis and assessments, as well as considerations and conclusions regarding the requirements being verified.

Regarding the applicability of this documentation structure, it is worth reminding that these definitions are meant to encompass testing for large sized satellites and large scale missions, and that, by following this structure, a great quantity documents would be generated, especially test specifications and procedures documents, considering at least one of each for each and every test.

In CubeSat missions, with simpler designs and simpler tests when compared to large sized satellites, where lower cost and rapid development are a focus, and especially considering that this is currently being applied to a single module, it is proposed for these documents to be combined and adapted to the documentation style of each project.

2.1 Test Plan Structure

As the purpose of this document is to provide guidance regarding the elaboration of test plans, based on the ECSS standards definitions, the following structure for the Test Plan document is proposed as a stating point:

- Introduction:
 - containing a description of the main objective, purpose and content of the document;
- Product presentation:
 - containing a description of the selected models for testing and their built status;
- Test program:
 - containing the main test matrix, linking each test with the corresponding specification, procedures, physical model used and reference to the requirements they verify;
 - description of each test block and test activity;
 - test flow and sequencing when necessary;
- Test facilities:
 - containing a description of the test facilities to be used, or requirements for selecting a test facility;
- Documentation:
 - containing a description of the documents to be produced;
- Schedule:
 - when test are to be executed in a specific time frame;
 - a schedule may not be needed for test plans meant to be recurrent.

CHAPTER 3

Test Objectives

The ECSS standards [2] define three main objectives for the testing process, qualification testing, acceptance testing and proto-flight testing. These objectives are directly related to the verification stages and model philosophy concepts of the verification process.

For each of these objectives, different margins regarding test levels and durations are defined and, when applicable, should be adopted directly from the standards document [2].

Regarding the test margins and required environmental tests, the launch provider may have its specific requirements. These take priority over the requirements defined in the ECSS standards.

In addition to these main objectives, a test plan may fulfill other purposes, such as to provide data for comparing different modules, or evaluate performance in research scenarios, for example. These additional objectives are not covered in the ECSS standards and are mainly relevant when the test plan is prepared for different purposes, outside of the verification process.

3.1 Qualification Testing

Qualification testing has the objective of verifying that the design of the item under test meets its applicable requirements, providing evidence that it performs in accordance to its specifications, considering the intended environment and qualification margins.

The qualification test plan is executed on dedicated qualification model units, manufactured specifically for the qualification tests.

3.2 Acceptance Testing

Acceptance testing has the objective of verifying that the item under test is in conformance with the verified design and is free from manufacturing defects or flaws, providing evidence that it performs in accordance to its specifications, considering the intended environment and acceptance margins.

The acceptance test plan is executed on every flight model unit.

3.3 Proto-flight Testing

Proto-flight testing combines the objectives of both qualification and acceptance testing. The proto-flight test plan may be executed on the first flight model unit and usually

combines qualification test levels with acceptance test durations for its margins.

CHAPTER 4

General Requirements

The ECSS-E-ST-10-03 [2] also defines testing requirements regarding test conditions, test input tolerances and measurement uncertainties, which are independent of the product (the item for which the standards are being applied), and no specific considerations were deemed necessary considering the EPS module.

These requirement are mostly relevant to environmental tests and, may be referenced directly from the standards document [2] when applicable.

The standards also define a series of reviews to be held before and after each test. In the context of a CubeSat mission, holding this many reviews would greatly lengthen mission time, especially if applied at module level testing. So, at this time, those reviews were not considered applicable.

CHAPTER 5

Baseline Test Matrix

The test matrix is where all the selected test for the test plan are presented and organized, it should contain or reference all the relevant information regarding each test.

Regarding the test program, the test matrix, presented in Table 5.1 is proposed as a baseline. It is intended to be applicable to different EPS architectures and cover most of the necessary tests. When writing a specific test plan, the relevant test activities applicable to the architecture as well as to the requirements of the EPS being tested should be selected. Also, any additional tests, specific to a given architecture, not covered in the baseline matrix, may be added as necessary.

Test Block	Test Activity
Inspection	Manufacturing Inspection Electrical Inspection Mechanical Inspection Integration Inspection
Functional	Harvesting System Output Channels Regulators Battery Management Output Channels Control Protection Circuits Sensor Readings Communication Buses
Performance	Module Power Consumption Harvesting Regulator Efficiency Output Channels Regulators Efficiency Battery Charging Regulator Efficiency Overall/System Efficiency
Mission	Mission Cases
Environmental	Vibration Thermal Vacuum Thermal Cycling Bake-out

Table 5.1: Baseline test matrix

The baseline test matrix is organized in four test blocks: inspection, functional, performance and environmental. Each block is composed of related test activities, and each activity is composed of one or more individual tests. Each individual test should be referenced to its specifications, procedures, model used and requirement being verified.

At individual test level, the dependencies on the specifics of each EPS architecture and implementation are greatly increased, so proposing individual tests at this moment is unfeasible considering this matrix, and the entire guidelines document, is intended to be adaptable to different topologies and architectures.

In the specific test plan, this matrix would need additional columns to include all the necessary information, and, for better organization, may be divided into multiple tables, as long as the tests are properly referenced.

In the next sections, a description of each block and activity will be presented.

5.1 Inspection

The Inspection test block has the objective of verifying the integrity of the manufacturing process and conformance of the physical model with the design files, ensuring there are no workmanship defects or flaws in the model.

This block is composed of the following activities:

- Manufacturing Inspection:
 - has the purpose of verifying the integrity of the manufacturing and transportation processes;
 - consists of visual inspection of the packaging conditions and conformance to the fabrication standards requirements;
- Electrical Inspection:
 - has the purpose of verifying the electrical integrity of the module;
 - consists of verifying conformance with the electrical schematics, checking solder quality and integrity, checking for absence of short circuits and performing first power up of the module;
- Mechanical Inspection:
 - has the purpose of verifying the physical properties of the board in relation to the design files;
 - consists of measurements of board dimensions, mass, size and position of mounting holes;
- Integration Inspection:
 - has the purpose of verifying that the module can be physically integrated with the satellite;
 - consists of checking the connectors pinout and positioning in relation to the design files.

5.2 Functional

The Functional test block has the objective of verifying that the module is capable of executing all of its required functions according to its designed specifications.

This block is composed of the following activities:

- Harvesting System:
 - has the purpose of verifying the correct operation and functioning of the module's harvesting system
 - consists of testing the relevant power converters as well as associated MPPT systems and algorithms;
- Output Channel Regulators:
 - has the purpose of verifying the correct operation and functioning of the output channels regulators;
 - consists of applying varying loads to the voltage regulators, according to the expected limits during mission operation;
- Battery Management:
 - has the purpose of verifying the correct operation end functioning of the battery management system;
 - consists of testing the associated regulators, verifying the operation of the monitoring systems, testing of the heating systems and associated algorithms;
- Output Channels Control:
 - has the purpose of verifying the correct operation and functioning of the output channels control system;
 - consists of testing the operation of the channel's power switches and correct functioning of regulator's enable pins;
- Protection Circuits:
 - has the purpose of verifying the correct operation and functioning of the modules protection circuits;
 - consists of the current limiting capabilities of power switches, integrated protections of regulators, batteries charging and discharging protections and associated algorithms;
- Sensor Readings:
 - has the purpose of verifying the correct operation and functioning of the sensors and the correctness of the readings;
 - consists of testing and comparison of the module's sensor readings against external measurement instruments;
- Communication Buses:

- has the purpose of verifying the correct operation and functioning of the communication buses and integrity of information;
- consists of checking the communication buses' configuration and protocols, verifying the integrity of the messages, including both external (for other modules) and internal (for peripherals) communication buses.

5.3 Performance

The Performance test block has the objective of verifying and evaluating the performance aspects of the module in relation to its requirements. The main focus of this block, considering and EPS module, is on evaluating the efficiency of the multiple conversion stages present in the module, as well as of the module as a whole. This usually consists of applying varying loads to the regulators and measuring input and output power consumptions in order to calculate the efficiency, resulting in an efficiency curve, providing data for different points of operation.

This test block is composed of the following activities:

- Module Power Consumption:
 - has the purpose of evaluating the power consumption of the isolated module, in normal operating conditions, with no loads connected;
- Harvesting System Efficiency:
 - has the purpose of evaluating the efficiency of the converters associated with the harvesting system;
- Output Regulators Efficiency:
 - has the purpose of evaluating the efficiency of the converters associated with the output channels;
- Battery Charge Regulators Efficiency:
 - has the purpose of evaluating the efficiency of the converters associated with the batteries;
- System Efficiency:
 - has the purpose of evaluating the efficiency of the system as a whole, considering all conversion stages;

5.4 Mission

The Mission test block has the objective of verifying the correct operation of the module in relation to the mission concept of operations. The activities of this block will involve simulations of expected scenarios during mission operation, considering what is feasible to simulate on ground. These may include, for example, system initialization, payload activation schedule, eclipse situations and other relevant scenarios. It is also included simulations of contingency situations, and time critical scenarios. Due to the nature of

this block, the test activities will be highly dependent on the specifics of each mission, and so no specific activities or scenarios are proposed at this moment.

5.5 Environmental

The Environmental test block has the objective of verifying that the module is capable of surviving and operating on the conditions of the environment it is exposed to.

The activities involve vibration tests, which relates to the launch conditions, and thermal vacuum, thermal cycling and bake-out tests, which relate to the space and orbit conditions; Specific details for these tests, including test levels and durations, are defined directly in the ECSS-E-ST-10-03 standard [2]. The requirements of the launch provider, when known, must also be taken into account and take precedence over the standards.

Bibliography

- [1] ECSS Secretariat. ECSS-E-ST-10-02 - Verification. Technical Report Rev.1, ECSS-ESTEC, 2 2018.
- [2] ECSS Secretariat. ECSS-E-ST-10-03 - Testing. Technical Report Rev.1, ECSS-ESTEC, 5 2022.

APÊNDICE B – PLANO DE TESTES EPS 2.0

A seguir é apresentada a primeira versão do plano de testes desenvolvido para o módulo EPS 2.0 desenvolvido pelo SpaceLab.

SLB-EPS2-QL-TPLAN-v0.1



EPS 2.0 Qualification Test Plan

EPS 2.0 Qualification Test Plan

SpaceLab, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - Brazil

February 2024

EPS 2.0 Qualification Test Plan
February, 2024

Project Chief:
Eduardo Augusto Bezerra

Authors:
Ramon de Araujo Borba

Contributing Authors:

Revision Control:

Version	Author	Changes	Date
0.1	R.A. Borba	Document creation	2024/02/14



List of Figures

List of Tables

Contents

List of Figures	v
List of Tables	vii
Nomenclature	vii
1 Introduction	1
2 Product Presentation	3
3 Test Programme	5
4 Test Facilities	7
5 Documentation	9
6 Schedule	11
References	13

CHAPTER 1

Introduction

This document presents a test plan for the qualification of the design of the EPS 2.0 module, developed for the Floripasat-2 service platform.

The main purpose of this test plan is to ensure that the design of the module is capable of performing in accordance with its specifications. A secondary objective is to generate data regarding the performance of this module for later comparison with different designs developed at SpaceLab.

CHAPTER 2

Product Presentation

For the execution of this test plan, dedicated qualification models of the EPS 2.0 shall be used.

CHAPTER 3

Test Programme

CHAPTER 4

Test Facilities

CHAPTER 5

Documentation

CHAPTER 6

Schedule

Bibliography
