

Adaptação de Processos Tradicionais à Construção de Painéis Solares para CubeSats

Jaqueline Vaz Maiolino¹, Marcelo Lopes de Oliveira e Souza²

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP, Brasil

¹Aluna de Doutorado no Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais - ETE, Opção Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais– CSE, do INPE

²Professor Doutor Colaborador no Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais - ETE, do INPE

jaquelinevazm@gmail.com

Resumo: *As missões com CubeSats continuam a crescer em número, variedade e importância. Em missões operacionais e comerciais, a Confiabilidade e a Disponibilidade são parâmetros-chave. Em CubeSats, as falhas identificáveis são majoritariamente causadas pelo subsistema de suprimento de energia (EPSS). Nestes, usam-se processos tradicionais, conflitando com as severas limitações dos CubeSats, começando pelos painéis solares. Assim, esses processos tradicionais precisam ser adaptados aos CubeSats. Por isto, este artigo trata a adaptação de processos tradicionais à construção de painéis solares para CubeSats. Para isto, resume tais processos, sugere algumas adaptações, e as ilustra com um estudo de caso. Por fim, conclui sobre os benefícios das adaptações customizadas.*

Palavras-chave: Adaptação; CubeSats; Painéis Solares; Processos.

1. Introdução

CubeSats são definidos como Unidades (U) com uma massa de até 1,33 kg e dimensões de $10 \times 10 \times 10$ cm (CAL POLY, 2015). CubeSats possuem comumente fatores de forma de 1-3U e 6U. As missões com CubeSats continuam a crescer em número, variedade e importância, estão sendo desenvolvidas por várias organizações, institutos de pesquisas e universidades. Em CubeSats, as falhas identificáveis são majoritariamente causadas pelo Subsistema de Suprimento de Energia (EPSS). Este, é essencialmente um dos subsistemas mais críticos de um satélite, uma vez que suas falhas possuem efeito catastrófico na missão (PAULA; MAGALHÃES, 2019). É o responsável pela geração, armazenamento, conversão e distribuição de energia aos diversos subsistemas nos níveis exigidos por eles (TORRES, 2014) durante a sua missão.

Em satélites operacionais, usam-se processos tradicionais de Engenharia de Sistemas Espaciais, conflitando com as severas limitações dos CubeSats, começando pelos painéis solares. Assim, esses processos e ou práticas tradicionais precisam ser adaptados aos CubeSats, pois tratam de descrições de alto nível ou são muito detalhadas para uso em CubeSats. Por isto, este artigo trata a adaptação de processos tradicionais à construção de painéis solares para CubeSats.

2. Os processos tradicionais de construção de painéis solares

Os processos, métodos e tecnologias atualmente em uso para os principais programas espaciais são baseados em 70 anos de lições aprendidas na exploração do espaço desde 04/10/1957 (WERTZ et al., 2011). Eles se baseiam em muitos sucessos e fracassos no espaço e representam nosso conhecimento coletivo sobre como fazer esses programas com eficiência e com alta probabilidade de sucesso.

Especificamente sobre os processos que envolvem o desenvolvimento de painéis solares para satélites artificiais na abordagem tradicional, são estabelecidos os seguintes macroprocessos: Projeto (*design*) (RAUSCHENBACH, 1980); Aquisição, Fabricação, Montagem, Integração e Testes (VAZ, 1999). Alguns destes se dividem em subprocessos, como por exemplo, o macroprocesso de Fabricação, dividido em: processo de fabricação do conjunto célula solar; processo de soldagem de módulos solares; processo de colagem dos módulos solares nos painéis; e processo de fabricação da cablagem.

Uma fonte de energia confiável é essencial para o sucesso de uma missão espacial. Confiabilidade é conceituada como a “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (RABELLO, 2017). A Confiabilidade de um painel solar é a probabilidade de ele funcionar de acordo com as suas especificações técnicas por um período em condições de órbita. O painel solar até então tem se mostrado como um recurso frequente para gerar energia elétrica a bordo, necessária para manter operacional todos os subsistemas de um satélite, ou de um sistema espacial, de acordo com as suas faixas de consumo especificadas, durante todas as fases da missão, vida útil e condições orbitais (VAZ, 1999).

A indústria espacial nacional possui larga experiência em geração de energia em órbita, e desenvolveu com sucesso os painéis solares para os seguintes satélites operacionais de grande e médio porte do INPE: Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres - CBERS-2B, CBERS-3, CBERS-4, CBERS-4A e Satélite de Observação da Terra - Amazonia-1.

Com base nessa experiência, nos requisitos elétricos, mecânicos, térmicos e de interface específicos do cliente (VAZ, 2014a), soluções específicas são projetadas e fabricadas para CubeSats, através de adaptações dos processos tradicionais de construção de painéis solares.

3. Adaptação de processos tradicionais à construção de painéis solares para CubeSats

Os CubeSats operam com uma demanda restrita de energia devido as limitações de suas fontes energéticas, bem como a pequena área disponível para as células fotovoltaicas, sua

massa limitada e volume de baterias. Para tanto, um projeto de sucesso depende de um bom dimensionamento do sistema de suprimento de energia (painéis solares, baterias, controles e formas de distribuição) (PAULA; MAGALHÃES, 2019).

O projeto, fabricação e testes dos painéis solares para um CubeSat Modelo de Voo a ser ilustrado a seguir foram realizados a partir de processos espaciais qualificados, baseado em práticas de Engenharia de Sistemas e Gerenciamento de Projetos, Gerenciamento de Garantia de Produto no setor espacial e padrões espaciais internacionais.

O projeto e técnicas de gerenciamento de projetos, planejamento, execução e controle reduzem riscos e contribuem para um desenvolvimento mais eficiente e seguro. As atividades de Garantia do Produto também são realizadas em todas as etapas do projeto de painéis solares para um CubeSat, para manter os processos e procedimentos de controle de configuração e verificação da conformidade com as normas e requisitos especificados.

Uma vez definidos os requisitos técnicos e restrições é realizado o processo de projeto (*design*), estabelecidos, por exemplo, diagramas elétricos, desenhos mecânicos, documentos de controle de interfaces, plano de desenvolvimento e verificação, fluxogramas e procedimentos de fabricação e verificação.

O fluxograma de fabricação contém a sequência de todas as etapas de fabricação e verificação. Após a aprovação do projeto, aquisições de partes, materiais e componentes é realizada. Uma revisão de prontidão para a fabricação (*Manufacturing Readiness Review – MRR*) é realizada para tem por objetivo verificar a situação do projeto e os processos associados antes do início da fabricação dos painéis solares.

No processo de fabricação, técnicas de inspeção são utilizadas para verificar o atendimento a requisitos específicos, tanto aplicados apenas como combinados com testes em todas as etapas e níveis de verificação dos requisitos especificados. As técnicas selecionadas normalmente incluem inspeção visual, dimensional e massa. Os requisitos também são verificados através da medição de desempenho e funcionalidade, sendo isto denominado “teste”. Uma Matriz de Verificação de Projeto (*Design Verification Matrix – DVM*) é definida e contém referências a documentos de verificação (relatórios de inspeções e testes) que permitem a verificação de cada requisito especificado.

Sendo assim, de forma adaptada, esses são os principais processos de construção de painéis solares para CubeSats.

4. Descrição geral do projeto de painéis solares para CubeSats

A descrição geral do projeto de painéis solares para CubeSats é apresentada a seguir (VAZ, 2014b):

Circuito Elétrico: cada painel possui *strings* que são a composição dos módulos solares (conexão serial), com arranjos de módulos solares conectados em paralelo. A composição de *strings* com o diodo de bloqueio e os terminais de conexão formam o circuito elétrico. *Strings* são posicionados de forma a minimizar o momento magnético residual dos circuitos.

Conjunto Célula Solar - Solar Cell Assembly (SCA): é responsável por converter a energia solar em energia elétrica no painel. Consiste em uma célula solar fotovoltaica com um interconector elétrico soldado ao barramento frontal e um vidro de cobertura colado na

superfície ativa da célula solar. O vidro de cobertura é utilizado para proteger as células solares contra a radiação de partículas (prótons e elétrons) encontradas no ambiente espacial. O SCA também recebe um diodo de by-pass para proteção contra defeitos que possam causar corrente reversa através do SCA. A Figura 1 (VAZ, 2014b) mostra um projeto típico de SCA.

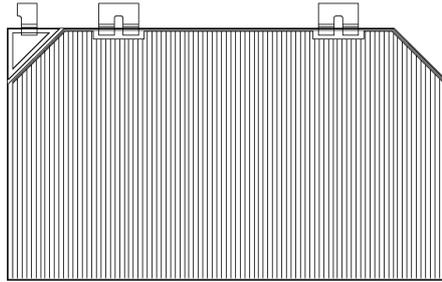


Figura 1: Projeto típico de um SCA, 70x40 (mm) [VAZ, 2014b].

As características de uma célula solar no início de vida (*Begin of Life* - BOL) são apresentadas na Tabela 1 (VAZ, 2014b).

Tabela 1. Características elétricas da célula solar (BOL, AM0, 28°C, 1353 W/m²) [VAZ, 2014b].

Célula Solar	Jisc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Jimp (mA/cm ²)	Vmp (mV)	Eff. (%)	Pm (mW/cm ²)
Tripla Junção InGaP/GaAs/Ge	17.2	2602	16.31	2280	27.49	37.2

Módulos Solares: são vários conjuntos de células solares (SCAs) conectados eletricamente em série. A Figura 2 (VAZ, 2014b) mostra o desenho esquemático do módulo solar com interligação.

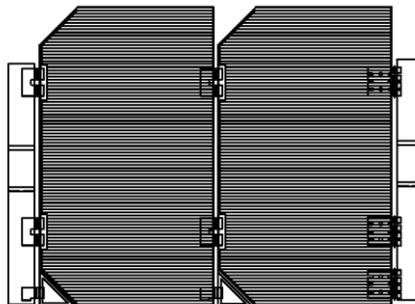


Figura 2: Projeto de um módulo solar [VAZ, 2014b].

Diodos de bloqueio: cada saída de tensão da *string* é conectada a um diodo de bloqueio para evitar corrente reversa das baterias durante a fase não iluminada ou danos causados por baixa tensão entre as *strings*.

Circuito de Potência: conecta os módulos solares e fornece conexão elétrica às linhas de potência disponíveis para alimentar os equipamentos do satélite.

Isolamento Elétrico: os SCAs são montados no painel sobre o isolamento elétrico, previamente colado ao painel em sua parte frontal e proporciona isolamento entre a estrutura do painel e os SCAs.

Circuito de sinal: linhas de transmissão de sinal através de linhas na estrutura, termistores e contatos de sinal compõem o circuito de sinal do painel solar. As linhas de contato permitem a soldagem de cabos para interligar os módulos de condicionamento de sinal.

Painel de Blindagem: instalado na superfície traseira para proteção contra radiação.

5. Fabricação e testes de painéis solares para CubeSats

O modelo de voo dos painéis solares para um CubeSat foi fabricado e submetido às inspeções e testes indicados na Tabela 2 (VAZ, 2014c). Os painéis solares desenvolvidos atenderam aos requisitos especificados (VAZ, 2014c).

Tabela 2 – Inspeção e testes de painéis solares para um CubeSat [VAZ, 2014c].

INSPEÇÃO / TESTE	PAINÉIS SOLARES PARA UM CUBESAT			
	Painel -X	Painel +X	Painel- -Y	Painel +Y
Inspeção Visual	X	X	X	X
Inspeção Dimensional	X	X	X	X
Verificação de Massa	X	X	X	X
Desempenho Elétrico	X	X	X	X
Continuidade Elétrica	X	X	X	X
Isolamento Elétrico	X	X	X	X
Vácuo	X	X	X	X

5.1. Resultados dos testes de desempenho elétrico

Os resultados dos testes de desempenho elétrico dos módulos solares e dos painéis solares de um CubeSat são apresentados a seguir.

Teste de desempenho elétrico dos módulos solares: o objetivo do teste de desempenho elétrico é submeter os módulos solares a pulsos de espectro de luz e intensidade equivalente à luz solar incidente no espaço próximo à órbita da Terra (AM0), e obter as características elétricas corrente versus tensão (IxV) do módulo solar. A Figura 3 (VAZ, 2014d) mostra um resultado de teste típico.

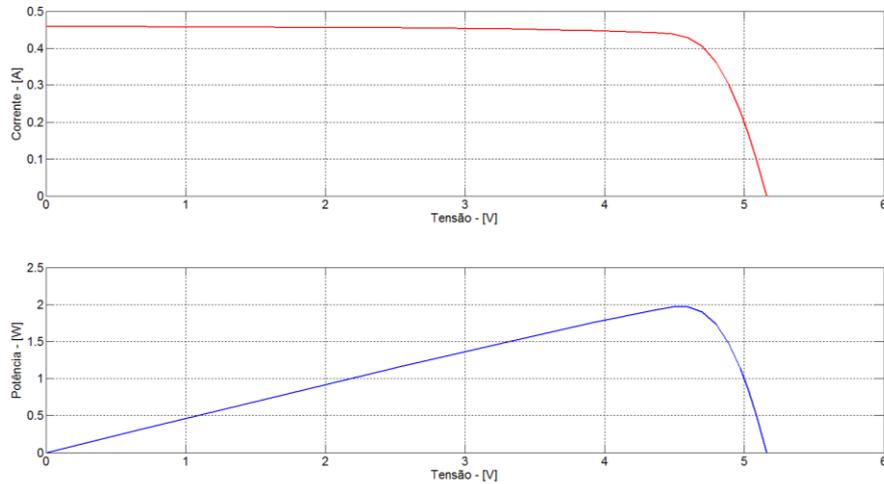


Figura 3: Resultado típico de teste de desempenho elétrico de um módulo solar - Corrente x Tensão (IxV) e Potência x Tensão (PxV) [VAZ, 2014d].

Teste de Desempenho Elétrico de Painéis Solares: foi realizado para verificar se os circuitos de potência atendem aos requisitos de potência mínima especificados. A Figura 4 (VAZ, 2014e) mostra o resultado do teste do circuito C3 (Módulo solar M5, M6 e M7). Os valores de referência foram: $P_{MAX} = 5,68 \text{ W}$, $V_{MAX} = 13,44 \text{ V}$ e $I_{MAX} = 0,42 \text{ A}$. Os valores medidos foram: $P_{MAX} = 5,88 \text{ W}$, $V_{MAX} = 13,54 \text{ V}$ e $I_{MAX} = 0,43 \text{ A}$.

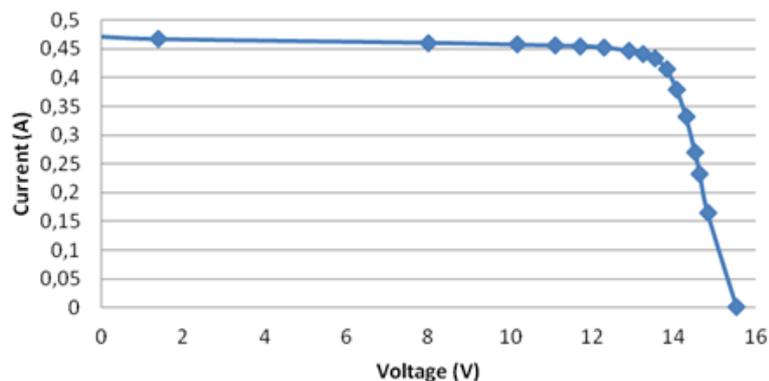


Figura 4: Típico resultado de teste de desempenho elétrico de um painel solar - corrente x tensão (IxV) [VAZ, 2014e].

6. Conclusão

Um dos benefícios da solução customizada de painéis solares para CubeSats é que os problemas de interfaces que podem aparecer no uso de painéis padronizados são removidos através da interação com o desenvolvedor/fabricante. Nos projetos de natureza acadêmica, a equipe de desenvolvimento de um CubeSat (universidade/instituto) tem mais uma oportunidade de participar do desenvolvimento e engenharia deste importante equipamento

do subsistema elétrico de potência, através da definição de *layout*, definição de circuitos elétricos, definição de interfaces, análise e testes funcionais para o painel solar para o CubeSat. Os processos adaptados e seus resultados demonstram que os painéis solares construídos para um CubeSat Modelo de Voo são confiáveis.

Referências

CAL POLY. **CubeSat Design Specification**. Revision 13. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2015.

PAULA E. S. F., MAGALHÃES, R. O. **Análise de balanço de potência, projeto preliminar de painel solar e dimensionamento de bateria de um Cubesat3U para detecção de raios**. In: CONGRESSO AEROESPACIAL BRASILEIRO, 2., Santa Maria, RS. Anais...2019.

RABELLO, A. P. S. S. **Um novo processo para melhorar a dependabilidade de sistemas espaciais entre as fases de planejamento e projeto detalhado incluindo extensões do Diagrama de Markov (DMEP) e da FMECA (FMEP) a projetos**. 2017. 344 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3MP6RNL>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/11.07.17.54-TDI). Tese (Doutorado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais. Orientador: Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza.) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3MP6RNL>>.

RAUSCHENBACH, H. S. **Solar cell array design handbook - the principles and technology of photovoltaic energy conversion**. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1980. 549p. ISBN 0-442-26842-4.

TORRES, L. C. G. **Análise do comportamento elétrico dos geradores solares da série de satélites CBERS e a confrontação dos resultados com os dados de projeto**. 203p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento de Sistemas Espaciais). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2014.

VAZ, C. C. **Geradores solares**. Curso de Tecnologias de Satélites. Divisão de Eletrônica Espacial – DEA. São José dos Campos: INPE, 1999. 80 slides.

____ ORB-1310-DI-003-03 **Documento de Controle de Interface**, Orbital Engenharia, 2014a.

____ ORB-1310-PL-010-02 **Descritivo do Projeto**, Orbital Engenharia, 2014b.

____ ORB-1310-PL-014-01 **Plano de Verificação e Teste**, Orbital Engenharia, 2014c.

____ ORB-1310-RL-040-00 **Caracterização Elétrica dos Módulos Solares**, Orbital Engenharia, 2014d.

____ ORB-1310-RL-080-00 **Relatório do Teste de Desempenho Elétrico dos Painéis Solares**, 2014e.

WERTZ, J. R., CONGER R. C., RUFER M., et al. **Methods for achieving dramatic reductions in space mission cost**. Reinventing Space Conference. Los Angeles, CA, 2011.