



Metodologia para Análise e Otimização do Processo de Soldagem de Interconexões entre Células Solares de Painéis Solares Empregados em Satélites Artificiais

MAIA, G. F. S.¹, BRITO, A. C.², SOUZA, M. L. O.³

¹Aluna de Mestrado do Curso Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE.
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

²Professor do Curso Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE.
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

³Professor do Curso Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE.
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

graziela.fernanda.souza@gmail.com

Resumo. *As melhorias da confiabilidade e da qualidade dos painéis solares usados em aplicações espaciais podem ser alcançadas otimizando-se o processo de soldagem das interconexões entre células solares. Assim, este artigo apresenta uma metodologia para análise e otimização do processo de soldagem de interconexões entre células solares de painéis solares empregados em satélites artificiais. Uma maneira de se obter o aumento da confiabilidade é por meio de uma análise minuciosa do processo e por meio da realização de um projeto de experimentos do processo de soldagem. Com essas duas ferramentas da qualidade pode-se obter a otimização do processo de soldagem. Com os resultados desse trabalho poderão ser obtidos os seguintes benefícios: (1) melhoria e otimização do processo envolvido na fabricação de painéis solares; e (2) o consequente aumento de desempenho e da vida útil de painéis solares.*

Palavras-chave: Interconexões; Célula Solar; Soldagem por Resistência a Ponto; Projeto de Experimentos; Confiabilidade.

1. Introdução

Sistemas complexos e altamente integrados como satélites, lançadores, aviões e automóveis precisam ter a sua confiabilidade aumentada e avaliada durante todo o seu ciclo de vida. O aumento e a predição da confiabilidade dos equipamentos empregados nesses



sistemas têm se tornado cada vez mais complexos e difíceis, à medida que os sistemas se tornam cada vez mais complexos e altamente integrados [Rabello 2017].

Os satélites, em particular, operam em condições severas impostas pelo ambiente espacial e, praticamente sem nenhuma manutenção durante sua fase operacional. Dentre os componentes que compõem o satélite, os painéis solares são os que mais sofrem com a severidade do ambiente de operação, pois, atuam normalmente em condições ambientais extremas [Baruel 2012].

Os satélites artificiais possuem sistemas eletroeletrônicos alimentados por baterias mantidas em funcionamento por meio da conversão de energia solar em energia elétrica realizada por painéis solares [Veissid et al. 2018]. O painel solar é constituído, basicamente, por células solares, dispostas em colunas e linhas. A célula solar é em última análise, o dispositivo responsável por essa conversão [Veissid et al. 2018] e [Vaz 1999].

Assim, este trabalho tem por objetivo determinar uma metodologia para análise e otimização do processo de soldagem de interconexões entre células solares de painéis solares empregados em satélites artificiais.

2. Conceitos Gerais

Os conceitos gerais considerados relevantes para este artigo estão descritos abaixo:

Painel solar: O painel solar pode ser definido como um arranjo de células solares, conectadas eletricamente em circuitos, dispostas numa matriz (elementos ordenados em linhas e colunas), também conhecidas como matrizes solares [Rauschenbach 1980].

Conjunto de Montagem da Célula Solar (do Inglês *Solar Cell Assembly - SCA*) – O conjunto de montagem da célula solar consiste na montagem da própria célula solar, mais o interconector, o diodo *bypass* e a cobertura de proteção de vidro (*coverglass*) [Vaz e Vaz 2007].

Célula Solar: A célula solar é um dispositivo semicondutor, também conhecida como célula fotovoltaica, capaz de converter a energia solar diretamente em energia elétrica [Rauschenbach 1980]. A célula solar de aplicação espacial deve apresentar uma alta confiabilidade, que é garantida por meio de realização de testes ambientais: ciclagem termo-vácuo, testes acelerados, choques mecânicos, radiação por partículas, teste de resistência à umidade (devido à estocagem), compatibilidade eletromagnética, etc., inspeção visual, caracterização da curva $I \times V$ (corrente por tensão), testes de aderência da metalização e da camada anti-refletora [Baruel 2012]. As disposições das células solares montadas em um painel solar são apresentadas na Figura 1, que apresenta a maneira como elas são dispostas no painel solar, desde o SCA, que montados em série formam os módulos designados como *strings* (células solares montadas em série com o diodo de bloqueio) e estas, montadas em paralelo formam o painel solar.

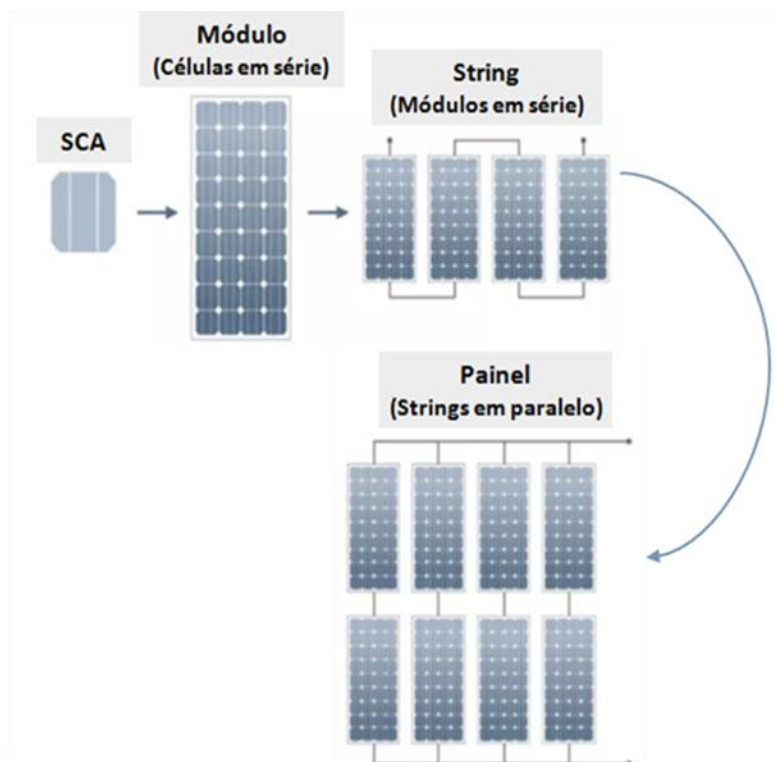


Figura 1. Configuração do painel solar. [Fonte: Adaptado de Standard Solar 2018]

Interconector: O interconector é um elemento que tem a função de conduzir a corrente elétrica de uma célula para a próxima e, no final de uma série de células solares, para um terminal ou ponto de interligação. Ele pode ser constituído, simplesmente por fios, mas é geralmente encontrado no formato de fitas de metal moldadas com espessuras bem finas, podendo chegar a 12 μm [Rauschenbach 1980] e [Vaz e Vaz 2007].

Coverglass: É uma cobertura feita de lâmina transparente de vidro Boro silicato, dopadas com dióxido de Cério, que previne a formação de centro de cores. A espessura dessa lâmina pode variar de 50 μm a 500 μm [Vaz 1999] e [Torres 2012].

Diodo Bypass: são dispositivos semicondutores, usados para a proteção da célula solar caso esta venha a sofrer polarização reversa. Isso pode ocorrer quando as células são dispostas em série/paralelo. São mais encontrados nas células solares de múltiplas junções por serem mais sensíveis às correntes reversas [Torres 2012].

Soldagem: Segundo a *American Welding Society* (AWS), o processo de soldagem é definido como a junção de materiais que produzem a coalescência entre eles, mediante o aquecimento à uma temperatura apropriada, com ou sem a aplicação de pressão ou com aplicação apenas de pressão e com ou sem o uso de materiais de adição [AWS 2018].

Soldagem a ponto por resistência elétrica do tipo “*welding*”: consiste em unir peças metálicas de superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, através do calor gerado na junta por meio de resistência a passagem de uma corrente elétrica (efeito Joule) junto com



a aplicação de pressão, o que gera certa fusão na interface dos materiais [Marques et al. 2005].

Este tipo de soldagem usando um par de eletrodos paralelos é um processo prático para a soldagem das células solares [Rauschenbach 1980]. Esse par de eletrodos paralelos e espaçados entram em contato com a peça de trabalho – neste caso, o interconector sendo soldado diretamente no barramento da célula solar.

Neste processo as partes são unidas colocando cada eletrodo apenas em um lado da superfície, a corrente de solda flui do eletrodo esquerdo por meio da parte superior e, parcialmente, para a parte inferior antes de retornar à fonte de alimentação, por meio do segundo eletrodo, formando uma lente de solda (ou ponto de solda), conforme ilustrado na Figura 2.

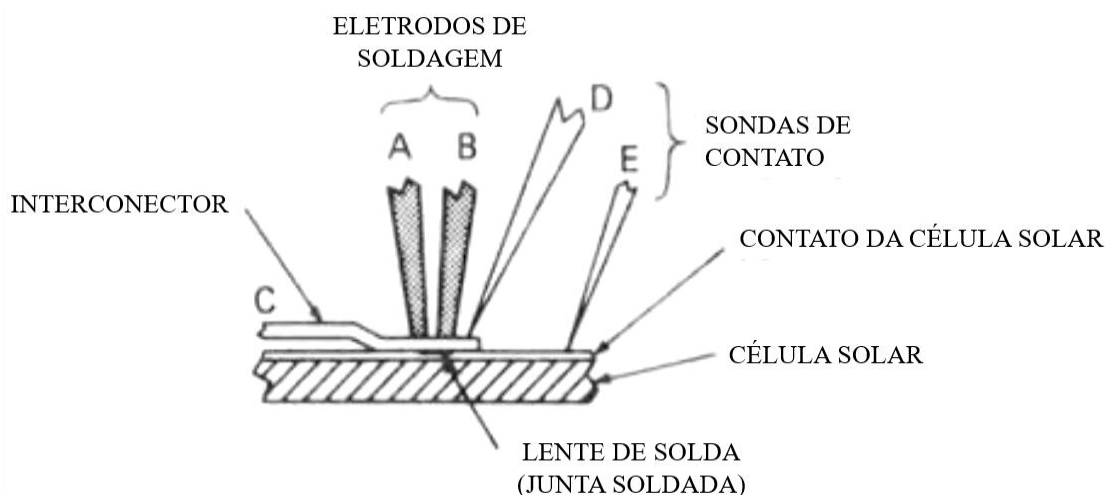


Figura 2. Soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos. [Fonte: Adaptado de Rauschenbach, 1980]

Os parâmetros mais importantes deste tipo de soldagem, segundo [An et al. 2014] e [Ávila e Bracarense 2017] são: corrente de soldagem, força de aplicação do eletrodo e o tempo de soldagem.

A resistência elétrica do elemento a ser soldado é um item de extrema importância, pois é responsável pelo Efeito Joule, porém não é considerado um parâmetro da soldagem [Aures 2006] mas sim uma propriedade de cada material.

Projeto de Experimentos: segundo [Lloyd 2001] é um método utilizado para se obter e organizar de forma sistemática o conhecimento, para que este possa ser usado a fim de melhorar as operações da maneira mais eficiente possível. Os autores [Souza et al. 2013] definem projeto de experimentos como uma poderosa ferramenta aplicada na investigação dos efeitos causados pelos parâmetros (fatores), os quais afetam, significativamente, na (s) resposta (s) dos processos.



3. Metodologia

A metodologia que vem sendo adotada neste trabalho consta das etapas descritas a seguir e representadas no fluxograma da Figura 3:

- I. Revisão bibliográfica utilizando a metodologia de revisão sistemática da literatura com busca de informações e referências nas principais bases de dados, incluindo o estudo do processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos e o detalhamento do problema a ser analisado;
- II. Escolha dos parâmetros e ou fatores controláveis considerados significativos, seleção da variável de resposta e um Planejamento Fatorial Completo;
- III. Seleção da matriz experimental e execução do experimento;
- IV. Análise dos dados;
- V. Conclusões e recomendações.

Se o tempo e as demais condições permitirem, os passos seguintes serão realizados para complementar a análise dos dados:

- VI. Planejamento Composto Central empregado para otimização dos parâmetros do processo, definição das variáveis do processo;
- VII. Obtenção da nova matriz experimental e execução dos experimentos;
- VIII. Análise dos dados, conclusões e recomendações.

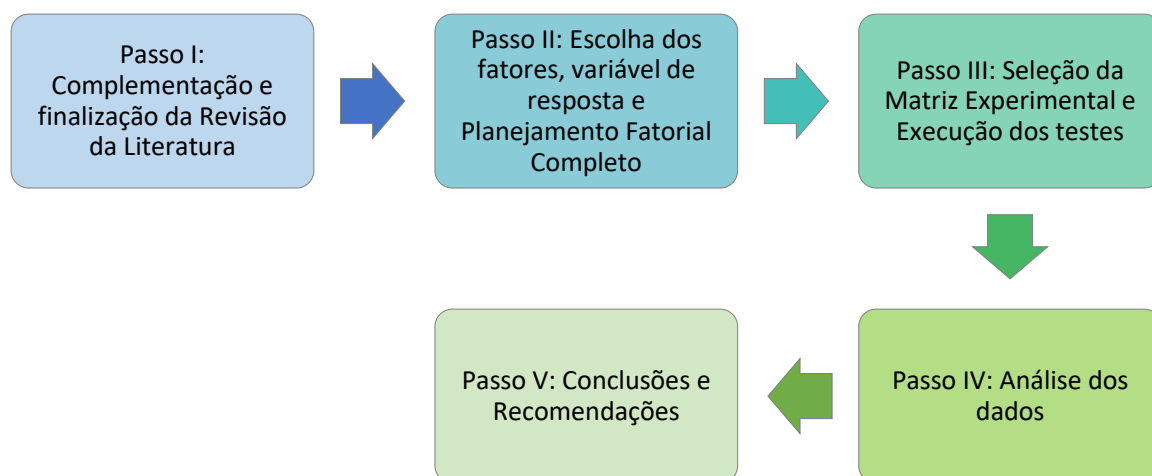


Figura 3. Fluxograma da metodologia adotada. [Fonte: Autores, 2019]

Passo I: Complementação e finalização da revisão da literatura

Foi realizada, inicialmente, uma revisão da literatura sobre os conceitos relacionados a este trabalho. No momento a revisão da literatura encontra-se na sua fase de



complementação e finalização para a elaboração da dissertação no que diz respeito ao processo de soldagem e relacionado a proposta do presente trabalho.

Passo II: Escolha dos fatores de entrada, da variável de resposta e realização do Planejamento Fatorial Completo

O segundo passo consiste em fazer o levantamento dos fatores de controle do experimento com maior potencial de influenciar no processo de soldagem; escolher a variável de resposta e realizar o Planejamento Fatorial Completo.

O Planejamento Fatorial Completo, segundo [Colombari 2004], [Montgomery 2005] e [Souza et al. 2013], é uma técnica experimental que consiste em realizar um experimento com k fatores, sendo que cada um deles é composto por dois níveis (por exemplo, alto e baixo ou inferior e superior). Nesta etapa são feitos os testes com todas as possíveis combinações dos níveis de fatores pré-estabelecidos.

A seleção da variável de resposta foi baseada na literatura e nas práticas realizadas por empresas que utilizam este tipo de processo de soldagem, desta forma, a variável de resposta escolhida foi a resistência máxima à ruptura (teste tração - *pull test*).

Segundo [Yi et al. 2008] os valores de resistência máxima de ruptura são considerados um importante índice utilizado na avaliação da qualidade do processo de soldagem do tipo “*welding*” por resistência elétrica, além de ser comumente aplicado na indústria para avaliação do processo.

Passo III: Seleção da matriz experimental e execução do experimento

A matriz experimental será obtida por meio da realização do experimento, empregando um fatorial completo, com réplicas, se necessárias, e com testes aleatórios.

Para este estudo será aplicado um experimento fatorial completo 2^k , sendo k fatores, a fim de se obter um número total de experimentos que possa auxiliar na obtenção dos parâmetros mais importantes a serem considerados no planejamento composto central.

Passo IV: Análise dos dados

Nesta etapa todos os conceitos estatísticos serão aplicados para discernir qual os efeitos e os fatores de controle que influenciarão na variável de resposta. Esta análise dos dados estatísticos permitirá a tomada de decisão em aceitar ou não as hipóteses formuladas nas etapas iniciais do experimento.

Os cálculos estatísticos, gráficos e relatórios serão realizados em softwares como o MINITAB®, EXCEL® e Matlab ou Octave para a análise dos dados.

Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos. Nesta etapa será verificado se os resultados encontrados têm sentido prático e físico.

Na análise dos dados será possível verificar:



- quais os fatores que apresentarão maior influência no processo de soldagem,
- quais possuem maior interação entre si,
- além de verificar os que causam pouca influência na qualidade da solda.

Passo V: Conclusões e Recomendações

Esta etapa será realizada com base na análise dos dados para inferir conclusões e fazer recomendações para a otimização do processo de soldagem.

4. Resultados Esperados

De acordo com os objetivos apresentados previamente, espera-se, no mínimo, os seguintes resultados:

I. Com a conclusão do primeiro passo:

A obtenção do estado da arte por meio da literatura técnica e da utilização de:

- Processo de soldagem a ser otimizado;
- Técnica de projeto de experimentos;
- Parâmetros de soldagem que influenciam na qualidade da solda.

E o detalhamento e a resolução do problema a ser analisado.

- II. Seleção dos fatores controláveis que contribuem para a boa qualidade da solda, seleção da variável de resposta e um Planejamento Fatorial Completo;
- III. Determinação da matriz experimental e execução do experimento;
- IV. Análise dos dados obtidos por meio da experimentação;
- V. Conclusões e recomendações para a otimização do processo de soldagem em estudo.

5. Considerações Finais

O propósito deste artigo foi apresentar o trabalho de dissertação avaliado na fase de proposta e o estágio em que ele se encontra. Foi apresentada a metodologia que vem sendo adotada. Para o trabalho final, há passos desta metodologia que se encontram parcialmente realizados (Passos I e II) e passos (III, IV e V) que ainda serão realizados para a conclusão da pesquisa. Os demais passos (de VI a VIII) citados anteriormente serão realizados se o tempo e as demais condições permitirem. Espera-se que com o resultado deste trabalho possa-se alcançar a otimização do processo de soldagem do tipo *welding* empregado nas interconexões das células solares.



Referências

- American Welding Society AWS. *Welding definition*. (2018). Disponível em: <https://awo.aws.org/glossary/welding/>. Acesso em: 20 de agosto de 2018 às 9h52.
- An, R., Xu, D. and Wang, C. (2014). “*Parallel-gap resistance welding between gold-plated silver interconnects and silver electrodes in germanium solar cells*”. 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, August 12 to 15. (ICEPT 2014) Chengdu, China. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6922812>>. Acesso em: 24 de agosto de 2018 às 14h56.
- Aures, J. E. V. (2006). “Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística”. 164p. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília, Brasil. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/6397>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2018 às 14h28.
- Ávila, T. L. D. e Bracarense, A. Q. (2017). “Influência dos Parâmetros de Soldagem no Ensaio de Torção de Solda a Ponto em um Dispositivo Automatizado Recém Desenvolvido”. *Soldagem & Inspeção*. Vol. 22 (2): 228-237. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2202.11>.
- Baruel, M. F. (2012). “Estudo da variação da corrente fotogerada nos painéis solares dos satélites do INPE”. 126p. Dissertação de Mestrado em Gerenciamento de Sistemas Espaciais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, Brasil.
- Colombari, R. R. (2004). “Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, Brasil.
- Lloyd, W. C. (2001). “*Reliability Improvement with Design of Experiments*”. 2nd Edition, Revised and Expanded. Quality and Reliability. New York. ISBN: 0-8247-0527-0
- Marques, P. V., Modenesi, P. J. e Bracarense, A. Q. (2005). “Soldagem: Fundamentos e Tecnologia”. Belo Horizonte – MG. Ed. da UFMG. 362p. ISBN 8570417489.
- Montgomery, D. C. (2005). “*Design and Analysis of Experiments*”. 6th Ed. New York: Wiley.
- Rabello, A. P. S. S. (2017). “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”. 344p. Tese de doutorado em Gerenciamento de Sistemas Espaciais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, Brasil.
- Rauschenbach, H. S. (1980). “*Solar cell array design handbook the principles and technology of photovoltaic energy conversion*”. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 549p. ISBN 0-442-26842-4
- Souza, M. T. S., Fernandes, M. M. e Miranda, R. C. (2013). “Otimização dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência em uma indústria automotiva por meio da análise de



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

- experimentos e metodologia de superfície de resposta”. *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*. 22 (2): 131 – 140, jul. – dez. ISSN 1983-4071.
- Standard Solar. (2018). Configuração painel solar. Disponível em <https://standardsolar.com.au/products/solar-panels/>. Acesso em: 17 de outubro de 2018 às 10h43.
- Steinmeier, D. (2010). “*Resistance Welding –Parallel Gap Welding Basics*”: By David Steinmeier. 04. Arcádia, CA 91007. Micro Joining Solutions – microTips™. Disponível em: http://www.microjoining.com/docs/1352551414_microtip_resistance_parallel_gap_welding.pdf. Acesso em: 21 de agosto de 2018 às 15h45.
- Torres, L. C. G. (2012). “Células Solares para uso espacial”. Apresentação do Curso de Tecnologia de Satélites. Divisão Eletrônica Espacial - DEA, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, Brasil. Notas de aula.
- Vaz, C. C. (1999). “Geradores Fotovoltaicos”. Apresentação do Curso de Tecnologia de Satélites. Divisão Eletrônica Espacial - DEA, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, Brasil. Notas de aula.
- Vaz, C. C., Vaz, J. V. (2007). “*Manufacturing And Testing Of The Electrical Part Of Solar Array For The China-Brazil Earth Resources Satellite – CBERS 2B*”. 19th International Congress of Mechanical Engineering. November 5-9, Brasília, Brasil.
- Veissid, N., Vilela, W. A. e Pasin, D. G. (2018). “Estudo dos parâmetros de saída de uma célula solar de tripla junção”. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. 17 a 20 de abril. Gramado, Brasil.
- Yi, L., Jinhe, L., Huibin, X., Chengzhi, X. and Lin, L. (2009). “*Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet*”. *Materials and Design*. n. 30, p. 2547-2555.