



Uma comparação entre estudos (2019 x 2021) sobre o processo de soldagem de interconectores a células solares de uso espacial

Graziela Fernanda de Souza Maia¹, Marcelo Lopes de Oliveira e Souza², Alírio Cavalcanti de Brito³

¹Mestre em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE

²Professor do Curso Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE.

³Professor do Curso Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE

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

graziela.fernanda.souza@gmail.com

Resumo. O processo de soldagem dos interconectores às células solares é considerado um dos mais críticos na fabricação de painéis solares. Durante a soldagem do interconector, a célula solar sofre um certo nível de degradação, devido ao calor envolvido neste processo de união. Por isso, é importante determinar quais parâmetros de processo são importantes e quais são seus níveis adequados, sem que ocorra muita degradação da célula solar. Assim, este artigo apresenta uma comparação entre estudos (2019, baseados em banco de dados; 2021, aplicando o método de Projeto e Análise de Experimentos) sobre o processo de soldagem de interconectores a células solares de uso espacial. Os parâmetros de soldagem considerados foram a tensão de soldagem, o deslocamento dos eletrodos, e o tempo de soldagem, tanto para os estudos anteriores quanto para os estudos atuais. Em todos os estudos a qualidade do ponto de solda foi verificada por meio de um teste de tração. Neste trabalho faz-se a comparação da nova análise de dados (2021) com outros estudos realizados no passado (2019). Os resultados sugerem que essa qualidade pode ser melhorada pelos níveis revelados por tal projeto e análise, visto que o tempo, custo e a qualidade podem ser melhorados com a aplicação do método.

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



1. Introdução

A busca frequente na redução de prazos e custos com a melhoria da qualidade, por meio de otimização, ainda nas fases de concepção e desenvolvimento dos processos referentes à fase de fabricação e lançamento de determinado produto, aliada ao gerenciamento eficaz e eficiente dos processos da fase de desenvolvimento de produtos, têm se tornado fatores essenciais para manter as organizações vivas em um mercado extremamente competitivo. E isto porque, em empresas competitivas, o período entre as fases de concepção e de desenvolvimento de produtos e as fases de fabricação e lançamento no mercado é cada vez mais curto, a fim de superar as organizações concorrentes (MOURA et al., 2006). Os processos envolvidos na fase de desenvolvimento de produtos são considerados importantes indicadores para medir a competitividade da empresa no mercado (ARAÚJO e COSTA, 2017). Quaisquer falhas nesses itens causarão riscos inaceitáveis para a missão.

Desta forma, uma maneira de alcançar competitividade e atender às necessidades dos *stakeholders* é a utilização do método de Projeto e Análise de Experimentos (do Inglês *Design and Analysis of Experiments* – DoE) ainda nas fases de concepção e desenvolvimento de produtos, visando a otimização de processos da fase de fabricação. Os conceitos dessa técnica são aplicados nas organizações para melhorar a qualidade de produtos e assegurar a satisfação dos *stakeholders* (GALDÁMEZ e CARPINETTI, 2004), além de contribuir com a prevenção de perdas de materiais na fase de fabricação, pois os parâmetros do processo de soldagem serão mais assertivos.

Durante a fabricação de um painel solar, um dos processos mais críticos é a soldagem dos interconectores às células solares. Por este motivo, é importante determinar quais parâmetros de processo são importantes e quais são seus níveis adequados, sem que haja degradação da célula solar. A variação na qualidade da soldagem por resistência a ponto pode afetar o desempenho e a confiabilidade dos produtos. A qualidade do ponto de solda pode ser verificada por meio do teste de resistência à tração (MAIA et al., 2020), pois isto garantirá a qualidade do contato elétrico (entre o dispositivo semicondutor – célula solar e o interconector) e o bom desempenho da célula solar após a soldagem.

As células solares são os dispositivos semicondutores que transformam a energia solar em energia elétrica. Os interconectores são responsáveis por 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. A Figura 1 apresenta uma foto de um interconector utilizado em projetos espaciais.



Figura1. Interconectores soldados à uma célula solar espacial. [Fonte: Strobl et al., 2014].



Assim, este trabalho apresenta uma comparação entre estudos (2019, baseados em banco de dados; e 2021, aplicando o método de Projeto e Análise de Experimentos) sobre o processo de soldagem de interconectores a células solares de uso especial. Os experimentos atuais foram realizados no segundo semestre de 2020, com o objetivo de encontrar os parâmetros e interações entre parâmetros do processo de soldagem que exercem maior influência na qualidade da solda de interconectores células solares de uso espacial.

Este artigo está assim organizado: a Seção 2 discute o problema e apresenta alguns conceitos importantes utilizados para o desenvolvimento deste trabalho; a Seção 3 apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho; a Seção 4 apresenta a comparação entre a análise atual e os estudos anteriores e a discussão; e a Seção 5 apresenta as considerações finais. Este artigo foi desenvolvido e concluído com a colaboração de uma indústria do setor aeroespacial localizada em São José dos Campos, São Paulo, e complementa outros estudos realizados recentemente.

2. Discussão do Problema e Conceitos Básicos

Esta seção tem como objetivo apresentar a discussão do problema e os principais conceitos básicos para a compreensão deste estudo.

Durante a fabricação de painéis solares, um dos processos mais críticos é a soldagem de interconectores a células solares (MAIA et al., 2019). Geralmente, as falhas que ocorrem em juntas de solda são devidas à fadiga, que estabelece o início e a propagação das trincas e, como consequência, a falha e a respectiva perda de função da junta soldada (BRITO, 2014). A fadiga que ocorre nos interconectores de células solares são uma das principais causas de falhas encontradas no painel solar (GIERTH et al., 2012; FERRO et al., 1997; PANDER et al., 2013; MEIER et al., 2016).

2.1. Processo de soldagem e as variáveis

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica consiste na passagem de uma corrente elétrica na junção de duas peças metálicas a serem soldadas. A soldagem é realizada por meio da geração de calor e pressão dos eletrodos suficientes para que o material metálico a ser soldado atinja o seu ponto de fusão. Neste instante, a lente de solda se forma; e, quando a corrente é cessada, ela se solidifica produzindo a junção das peças (SOUZA et al., 2012).

Para soldagem de interconectores a células solares, é utilizado o processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos. Este é um dos mais comuns processos de soldagem por resistência utilizados para soldar estes tipos de componentes. Na Figura 2 é apresentado o referido processo.

O processo de soldagem da Figura 2 consiste em um par de eletrodos espaçados por uma distância pré-determinada que entra em contato com o interconector sobreposto à célula solar; a corrente elétrica flui através dos eletrodos e de parte da interconexão que está logo abaixo e no centro dos eletrodos; o calor gerado na resistência oferecida pela peça de



trabalho eleva a temperatura da peça a ser soldada até a temperatura de soldagem (próxima ao ponto de fusão ou acima); a pressão exercida pelos eletrodos na peça de trabalho facilita a junção dos componentes envolvidos no processo (RAUSCHENBACH, 1980; STEINMEIER, 2010).

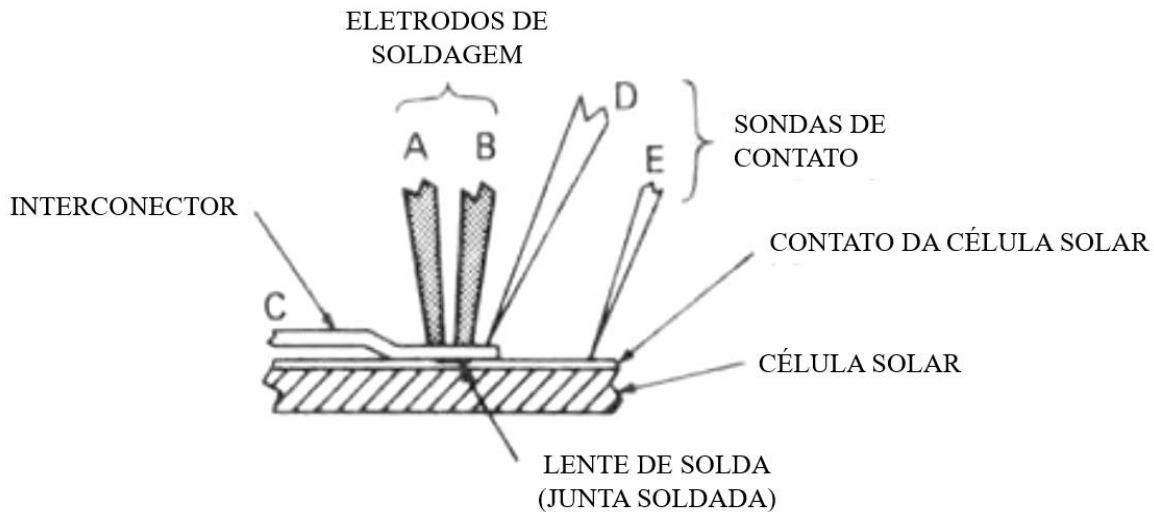


Figura 2. Ilustração do Processo de Soldagem por Resistência Elétrica com Eletrodos Paralelos. [Fonte: Adaptada de RAUSCHENBACH,1980].

A corrente de soldagem envolvida no processo de soldagem dos interconectores às células solares advém de um pulso de corrente contínua que gera a energia necessária para que ocorra a fusão dos materiais envolvidos. Este pulso de corrente possui os seguintes parâmetros ajustáveis: a tensão de soldagem, tempo de rampa de subida da tensão, tempo de patamar de tensão constante e tempo da rampa de descida da tensão (MAIA, 2021).

A pressão ou força que os eletrodos exercem sobre as peças de trabalho tem o objetivo de prender, segurar, unir as peças envolvidas no processo de soldagem, por meio de pressão antes, durante e depois do fornecimento da corrente de soldagem (MAIA, 2021).

O tempo de soldagem é compreendido como o intervalo de tempo da aplicação de corrente de soldagem para que se possa produzir o ponto de solda (MAIA, 2021).

2.2. Projeto e Análise de Experimentos

Projeto e Análise de Experimentos é um método que se refere ao processo de planejar experimentos de forma que os dados adequados possam ser obtidos e analisados por meio de métodos estatísticos, que resultam em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2017). Desta forma, o principal objetivo deste método é avaliar como as alterações nos fatores de entrada afetam os resultados, ou respostas do experimento.

De acordo com Montgomery (2017), as diretrizes que devem ser seguidas nesta metodologia para alcançar o sucesso são apresentadas na Figura 3:

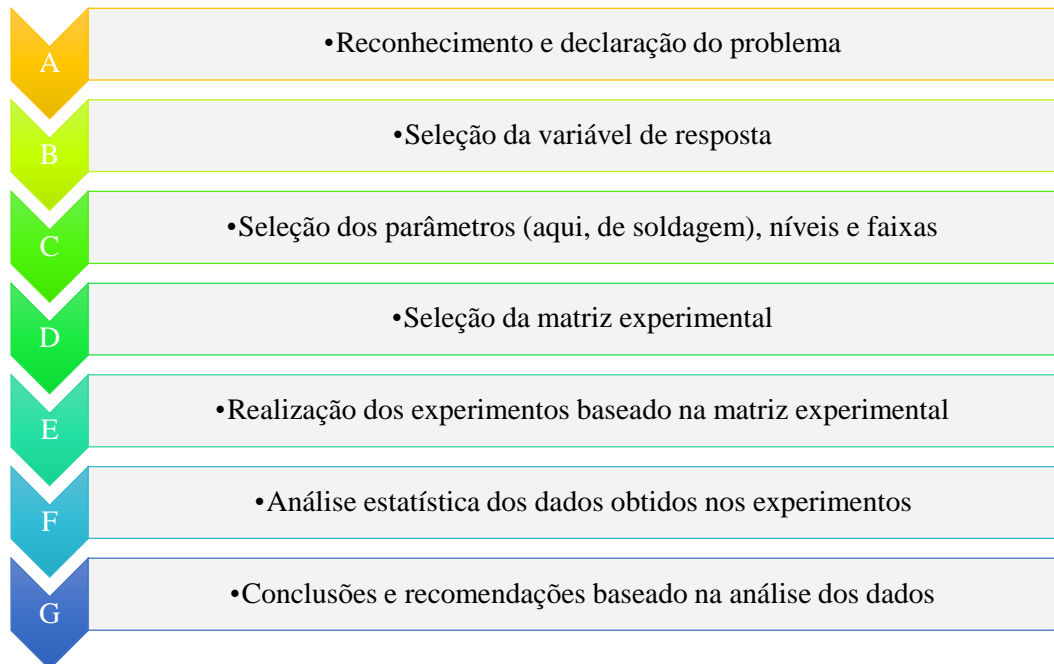


Figura 3. Diretrizes para Projeto e Análise de Experimentos. [Fonte: Adaptada de MONTGOMERY, 2017].

A descrição detalhada de cada uma das etapas do método de Projeto e Análise de Experimentos mencionadas na Figura 3 podem ser obtidas em (MAIA et al., 2019).

3. Metodologia

A metodologia aplicada nesta pesquisa foi baseada nas diretrizes apresentadas na Figura 3. A matriz experimental com o arranjo utilizado no experimento é apresentada na Tabela 1.

A Tabela 1 apresenta os níveis superiores e inferiores dos parâmetros de soldagem, representados, respectivamente, pelos números +1 e -1 (os valores estão codificados para assegurar o segredo industrial do processo). O parâmetro [A] refere-se ao deslocamento do eletrodo até a peça; parâmetro [B] a tensão de soldagem; e o parâmetro [C] ao tempo de soldagem.

Tabela 1: Arranjo dos parâmetros de soldagem. [Fonte: Autora].

[A]	[B]	[C]
1	1	1
1	1	-1
1	-1	1
1	-1	-1
-1	1	1
-1	1	-1
-1	-1	1
-1	-1	-1



Os estudos anteriores foram realizados com base em um banco de dados da empresa. Esses dados foram levantados buscando-se a melhor combinação entre parâmetros de soldagem de forma aleatória, apenas embasada na experiência do profissional que realiza a solda e em experimentos anteriores. Os estudos anteriores foram analisados com 32 (MAIA et al., 2019) e 36 (MAIA et al., 2020) pontos de solda.

Já o estudo atual se baseia na aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos. Para isto, foi realizado um levantamento de quais parâmetros de soldagem seriam utilizados e quais os valores mínimos e máximos. Feito isto, os parâmetros escolhidos foram: deslocamento dos eletrodos, tensão de soldagem, tempo de soldagem (a corrente efetiva de soldagem depende da tensão de soldagem aplicada e do tempo de soldagem). Para o estudo atual foram analisados 32 pontos de solda com 2 (níveis) ou valores para cada um dos 3 parâmetros de soldagem pré estabelecidos; e 4 repetições de cada corrida, para lidar com suas incertezas.

4. Comparação entre Estudos e Discussão

Esta seção tem por objetivo apresentar as análises anteriores (MAIA et al., 2019; MAIA et al., 2020) e as atuais e fazer uma comparação entre elas. O método de avaliação dos parâmetros de soldagem foi o mesmo em ambas as ocasiões, ou seja, o teste de tensão de arrancamento (*pull test*) aplicado à junta de solda.

Os estudos anteriores foram baseados em banco de dados de soldagem de interconectores a células solares. Eles mostraram que o parâmetro de soldagem mais significativo foi a tensão de soldagem. Já a interação entre parâmetros de soldagem mais significativa foi a tensão de soldagem com o tempo de soldagem. Isto era esperado, pois a tensão de soldagem, aliada ao tempo de soldagem, tem grande influência na qualidade do ponto de solda, visto que são responsáveis pelo pulso de corrente que dá origem à lente de solda.

Neles, as primeiras análises (MAIA et al., 2019; MAIA et al., 2020) não foram realizadas com experimentos planejados, mas com a utilização de um banco de dados de pontos de solda realizados em interconexões soldadas à células solares.

A Figura 4 mostra os parâmetros de soldagem que se destacaram em relação ao teste de tração. Estes dados foram obtidos em um estudo anterior baseado no banco de dados dos pontos de solda. O teste de tração foi medido em Newtons (N).

Este gráfico analisa de forma isolada cada um dos parâmetros de soldagem, mantendo os demais constantes.

A leitura dos gráficos é feita com base na variação que a mudança do nível inferior para o superior da variável de entrada promove na variável de resposta; portanto, quanto maior for a variação na resposta, mais significativo será o fator em análise.

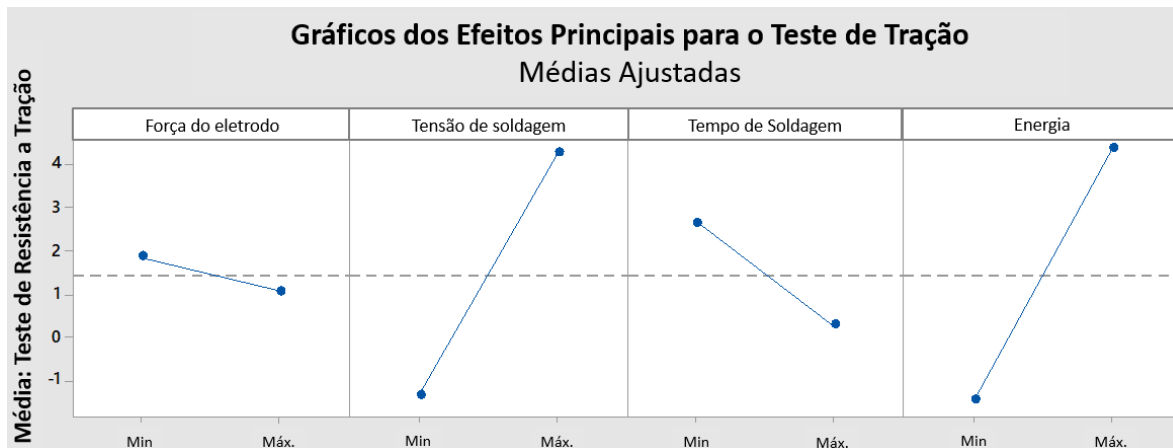


Figura 4. Gráfico dos efeitos principais para o teste de tração [MAIA et al., 2019].

Analisando os quatro gráficos da Figura 4 observa-se que houve um efeito negativo para o “deslocamento do eletrodo até a peça” (primeiro quadro da Figura 4), e para o “tempo de soldagem” (terceiro quadro da Figura 4), ou seja, mantendo esses parâmetros em seus níveis mínimos é possível maximizar a resposta do processo, obtendo valores maiores para o valor do teste de resistência a tração. Já a “tensão de soldagem” (segundo quadro da Figura 4) apresentou um efeito positivo, assim como a “energia” envolvida no processo, ou seja, quando o parâmetro é mantido em seu nível máximo tem-se uma maior resposta de valor de teste de resistência a tração, para esta configuração experimental.

No estudo apresentado na Figura 4, foi considerada a influência da energia envolvida no processo; porém, após estudos e análises do processo, decidiu-se por não considerar esse parâmetro nas análises atuais, visto que esse parâmetro pode ser apenas monitorado e não alterado conforme os demais; e este parâmetro ser função da corrente de soldagem aplicada pelo tempo de soldagem. De acordo com a Figura 4 nota-se que para alcançar valores maiores no teste de tração é necessário a “força do eletrodo” na configuração mínima, a “tensão de soldagem” na configuração máxima e o “tempo de soldagem” na configuração mínima. O parâmetro “energia” foi apenas monitorado; sendo assim, maiores valores no teste de tração são alcançados com máxima energia.

Os parâmetros “força do eletrodo” e “deslocamento do eletrodo” estão com a mesma unidade tanto para o experimento anterior baseado no banco de dados, quanto para o experimento atual com o emprego do método de Projeto e Análise de Experimentos. O nome “deslocamento do eletrodo” foi utilizado nos estudos atuais por ser mais adequado devido à unidade utilizada (número de passos do motor – n_{pm}).

Já os estudos atuais realizados com a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos, revelaram que os parâmetros de soldagem mais significativos foram: a “tensão de soldagem” e o “tempo de soldagem”, conforme esperado e referido anteriormente. Dentro do planejamento dos experimentos, várias interações entre parâmetros de soldagem se mostraram significativas, com destaque para o deslocamento dos eletrodos *versus* a corrente efetiva.



A Figura 5 mostra o estudo mais atual, considerando os parâmetros (deslocamento do eletrodo, tensão de soldagem, tempo de soldagem e a corrente efetiva de soldagem) aplicando o método de Projeto e Análise de Experimentos.

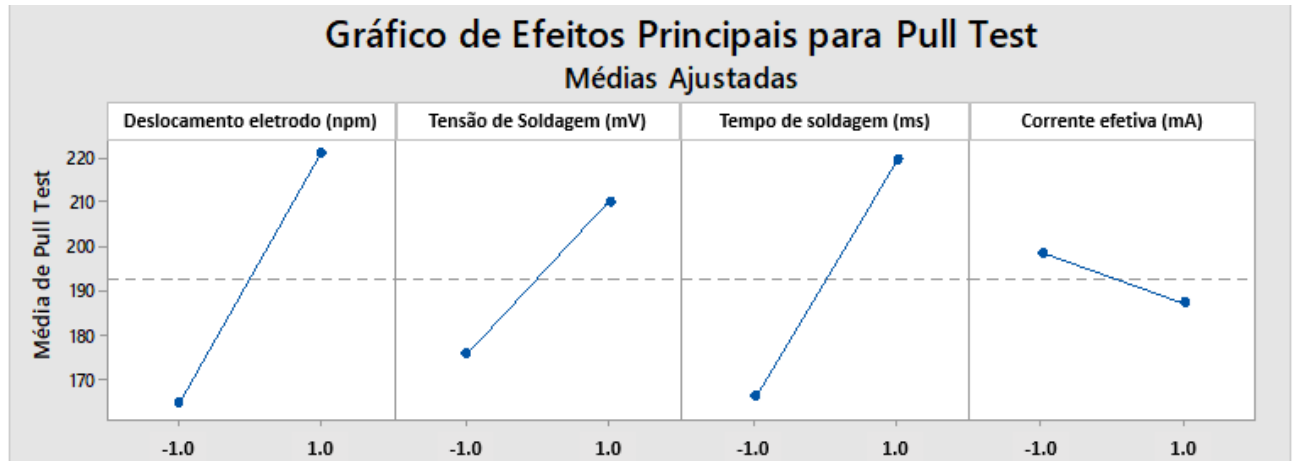


Figura 5. Gráfico dos efeitos principais para o *pull test* baseado em Projeto e Análise de Experimentos. [Fonte: MAIA, 2021].

A Figura 5 revela que os parâmetros de soldagem “deslocamento dos eletrodos”, a “tensão de soldagem” e o “tempo de soldagem” devem estar em seus níveis de configuração superiores (+1) para alcançar valores de *pull test* maiores, ou seja exercem um efeito positivo na variável de resposta (*pull test*). A “corrente efetiva” produz uma variação muito pequena quando analisada isoladamente, ou seja, pouco significativa, visto que é dependente da tensão e tempo de soldagem.

Após as comparações entre o estudo anterior baseado em banco de dados e o segundo baseado na aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos, foi possível verificar que a tensão de soldagem e tempo de soldagem são os parâmetros que exercem as maiores influências na qualidade do ponto de solda. Isto se deve ao fato de que a combinação entre esses parâmetros dá origem ao pulso de corrente responsável pela formação da lente de solda.

Esta análise mostra que esses parâmetros são de fato os mais significativos para o processo de soldagem, quando comparado a outros tipos de processo de soldagem a ponto por resistência elétrica que possuem o mesmo princípio de funcionamento para a formação do ponto de solda.

Esta análise valida a avaliação dos parâmetros de soldagem mais significativos para a formação do ponto de solda que foram realizadas no passado com base em banco de dados fornecidos pela empresa; porém, os estudos atuais são mais precisos quanto aos valores ideais para cada um dos parâmetros de soldagem.

Além de comparar os estudos anteriores com estudos atuais este trabalho mostra que o método de Projeto e Análise de Experimentos consegue uma otimização dos parâmetros de soldagem com uma menor quantidade de dados, visto que análises embasadas na aplicação do método proporcionam resultados mais assertivos, com um menor tempo de execução dos experimentos e maior qualidade dos resultados.



5. Considerações Finais

O estudo apresentado aqui mostra a comparação entre os estudos anteriores baseados em banco de dados fornecidos pela empresa e o estudo atual baseado no método de Projeto e Análise de Experimentos, ou seja, planejados com um número determinado de (soldagens) corridas (32), com 2 (níveis) ou valores para cada um dos 3 parâmetros de soldagem pré estabelecidos; e 4 repetições de cada corrida, para lidar com suas incertezas.

Desta forma, esta análise teve a finalidade de comparar as verificações feitas anteriormente baseada no banco de dados com a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos.

A comparação mostrou que as análises iniciais baseadas em banco de dados são semelhantes as análises com a aplicação do método de Projeto e Análise de Experimentos, mas os estudos atuais foram mais assertivos quanto aos valores ideais para cada um dos parâmetros de soldagem, pois, os experimentos baseados em *DoE* são mais eficientes, de menor tempo de execução e de melhor qualidade, proporcionando assim, uma resposta mais rápida quanto ao processo ainda nas fases iniciais.

Devido ao sigilo de processo, os valores otimizados para cada um dos parâmetros de soldagem analisados não foram revelados. O estudo apresentado pode ser direcionado para análises futuras que tenham como objetivo de encontrar parâmetros ótimos de soldagem para esta aplicação.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE pela oportunidade de realizar o mestrado em ETE/CSE, e à Orbital Engenharia pela colaboração e o fornecimento dos interconectores e células solares, instalações, laboratórios e recursos humanos para a realização deste trabalho.

Referências

ARAÚJO, J. G. P., COSTA, M. A. B. Gestão do processo de desenvolvimento de produtos: práticas e desafios. III Congresso Internacional de Logística e Operações. Tema: Gestão estratégica e competitividade. Suzano – SP, 25 e 26 de outubro. **Anais**, v. 3. p.722-742. Serviço de Biblioteca e Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Suzano. (2017). ISBN: 978-85-5790-003-5.

BRITO, A. C. **Comparação experimental de técnicas de regressão linear para análise da confiabilidade dos empacotamentos CBGA submetidos à ciclagem térmica e proposta de um novo método para o ajuste e a predição de suas falhas**. 2014. (Tese de Doutorado). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP7W/3FL9RAL>>. Acesso em: 17/10/2021.

FERRO, R. J.; FRANCIS, R. W.; FRASCO, E. B.; PAN, R. B. et al. Novel techniques for evaluation of interconnections in solar cells used for spacecraft power generation. Paper presented Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1997. **Proceedings...** IEEE; Anaheim, California, United States. DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654246>.



GALDÁMEZ, E. V. C., CARPINETTI, L. C. R. Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Fabricação de Produtos Plásticos. **Gestão & Produção** [online], São Carlos, v. 11, n. 1, p. 121-134, Apr. (2004).

GIERTH, P.; REBENKLAU, L.; MICHAELIS, A. Evaluation of soldering processes for high efficiency solar cells. 2012. Paper presented 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. **Proceedings...** IEEE; Bad Aussee, Austria. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2012.6273123>.

MAIA, G. F. S., BRITO, A. C., SOUZA, M. L. O. Técnica de projeto e de análise de experimentos aplicada ao processo de soldagem de interconectores entre células solares de uso especial, in 4º Congresso ABRISCO 2019. 2 a 4 de dezembro 2019. **Anais**. Rio de Janeiro. Brazil. Paper number 053. 2019.

MAIA, G. F. S.; SOUZA, M. L. O.; BRITO, A. C. Preliminary analysis of solar cell interconnections welding parameters using design of experiments for future optimization. 2020. **Journal of Aerospace Technology And Management** São José dos Campos, v. 12, Special Edition, p. 12-24, 2020. doi.org/10.5028/jatm.cab.1151.

MAIA, G. F. S. **Estudo e otimização do processo de soldagem de interconectores às células de painéis solares empregados em satélites artificiais aplicando projeto e análise de experimentos**. 2021. (Dissertação de Mestrado). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/44KK4GS>. Acesso em: 09 out. 2021.

MEIER, R.; PANDER, M.; GROBER, S.; DIETRICH, S. Microstructural optimization approach of solar cell interconnectors fatigue behavior for enhanced module lifetime in extreme climate. **Energy Procedia**, v. 92, 2016, p. 560-568, ISSN 1876-6102. DOI: doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.020.

MONTGOMERY, D, C. **Design and analysis of experiments**. 2017. Hoboken: John Wiley& Sons.

MOURA, M. J. C., DROGUETT, E. L., JACINTO, C. M. C. Testes acelerados de vida para o crescimento da Confiabilidade de produtos em desenvolvimento. XXVI ENEGEP –**Anais**. Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de outubro. (2006).

PANDER, M.; MEIER, R.; SANDER, M.; DIETRICH, S. et al. Lifetime estimation for solar cell interconnectors. 2013. In: 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. **Proceedings...** DOI: [10.4229/28thEUPVSEC2013-4CO.10.3](https://doi.org/10.4229/28thEUPVSEC2013-4CO.10.3).

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

SOUZA, M. T. S., FERNANDES, M. M. e MIRANDA, R. C. Otimização dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência em uma indústria automotiva por meio da análise de experimentos e metodologia de superfície de resposta. **Ciência & Engenharia** (Science & Engineering Journal). v. 22 (2): 131 – 140, Jul. – Dez. (2013). ISSN 1983-4071.

STEINMEIER, D. **Resistance welding –parallel gap welding basics. 04**. Arcádia, CA 91007. Micro Joining Solutions – micro Tips TM. (2010). Disponível em: http://www.microjoining.com/docs/1352551414_microtip_resistance_parallel_gap_welding.pdf. Acesso em: 21 de agosto de 2018 às 15h45.

STROBL, G. F. X.; et al. Development of lightweight space solar cells with 30% efficiency at end-of-life. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALIST CONFERENCE, 40 (PVSC), 2014, Denver, CO, USA, IEEE. **Proceedings...** p. 3595-3600. DOI: [10.1109/PVSC.2014.6924884](https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6924884). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6924884>. Acesso em: 04 fev. 2020.