



ANÁLISE PRELIMINAR DOS PARÂMETROS E INTERAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE INTERCONEXÕES ENTRE CÉLULAS SOLARES EMPREGANDO PROJETO DE EXPERIMENTOS VISANDO SUA FUTURA OTIMIZAÇÃO

Graziela Fernanda de Souza Maia ^a, Alírio Cavalcanti de Brito ^b, Marcelo Lopes de Oliveira e Souza ^c

[a] Mestranda do Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: graziela.fernanda.souza@gmail.com

[b] Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: aliriobrito50@gmail.com

[c] Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: marcelosouzabr@ig.com.br

Resumo: *Um dos processos que determinam a confiabilidade de painéis solares usados em aplicações espaciais é a soldagem das interconexões existentes entre duas células solares adjacentes. Este processo tem várias tecnologias, sequências e atividades que possuem várias características, fatores e parâmetros. As combinações e os valores destes admitem inúmeras possibilidades, tornando seus ajustes demorados, custosos e exaustivos. Uma maneira de abreviar isto, alcançar competitividade e atender às necessidades dos interessados é por Análise e Projeto de Experimentos. Esta técnica auxilia na otimização dos melhores ajustes para a obtenção dos resultados esperados. Assim, este artigo apresenta uma análise preliminar dos parâmetros e suas interações do processo de soldagem (por resistência elétrica com eletrodos paralelos – parallel-gap resistance welding) de interconexões entre células solares empregando projeto de experimentos. Neste processo de soldagem, a célula sofre certo nível de degradação. Por esta razão, é importante determinar quais parâmetros do processo são importantes e quais são os seus níveis adequados, sem que ocorra muita degradação da célula. O resultado desta análise poderá ser empregado na otimização do processo de soldagem atendendo aos requisitos do projeto quanto à confiabilidade e ao desempenho.*

Palavras-chave: *Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica, Células Solares, Projeto de Experimentos, Otimização, Confiabilidade.*

1. INTRODUÇÃO

Sistemas complexos e/ou altamente integrados como os satélites, lançadores, aviões e automóveis têm a necessidade de avaliação da sua confiabilidade durante todo o seu ciclo de vida. A predição da confiabilidade de equipamentos usados no setor espacial tem se tornando mais elaborada e difícil à medida que esses sistemas espaciais estão se tornando cada vez mais complexos e/ou altamente integrados (RABELLO, 2017).

Particularmente, os satélites artificiais operam em condições severas impostas pelo ambiente espacial e, praticamente, sem nenhuma manutenção durante sua fase de operação. Dentre os componentes dos subsistemas que compõem o satélite, os painéis solares são os que mais sofrem com a severidade do ambiente operacional (BARUEL, 2012).

Os satélites possuem sistemas elétricos autossuficientes que utilizam baterias para mantê-lo em funcionamento por meio da conversão de energia solar em elétrica. A célula solar é o dispositivo responsável por essa conversão (VEISSID *et al.*, 2018). O painel solar é composto basicamente por células solares, dispostas em colunas e linhas (VAZ, 1999).

Segundo Vaz (1999), os painéis solares têm a função de gerar a energia de bordo necessária para manter operacionais todos os subsistemas que compõem o satélite, dentro das faixas de consumo especificadas durante todas as fases da missão, vida útil e condições orbitais para o qual ele foi projetado.

Em geral, as células solares são a fonte primária de energia para que o satélite possa estar em operação no espaço. Cada uma dessas células tem a função de gerar uma pequena quantidade de energia elétrica; portanto, cabe à equipe de projeto determinar o número de células solares requeridas em um painel solar, para suprir a energia necessária ao satélite durante sua vida útil (BARUEL, 2012).

Um dos processos críticos na fabricação de painéis solares é o processo de soldagem dos interconectores nas células solares. O interconector é o elemento responsável por conduzir a corrente de uma célula para a próxima e, no final de uma série de células solares, disponibilizar a energia para um terminal ou ponto de interligação (RAUSCHENBACH, 1980; VAZ e VAZ, 2007).

Um dos processos que determinam a confiabilidade de painéis solares usados em aplicações espaciais é a soldagem das interconexões existentes entre duas células solares adjacentes. Este processo tem várias tecnologias, sequências e atividades que possuem várias características, fatores e parâmetros. As importâncias e os valores destes admitem inúmeras combinações, tornando seus ajustes demorados, custosos e exaustivos. Uma maneira de abreviar isto, alcançar competitividade e atender às necessidades dos interessados é por Análise e Projeto de Experimentos. Esta técnica auxilia na otimização dos melhores ajustes para a obtenção dos resultados esperados. Portanto, sob o ponto de vista da confiabilidade, uma das principais preocupações dos fabricantes de painéis solares é a qualidade da solda existente nas interconexões das células.

O'Connor e Kleyner (2012) cita que um dos processos críticos para confiabilidade de componentes eletrônicos é o processo de soldagem envolvido na fabricação dos referidos itens, pois existe um número de falhas elevado atribuído à fadiga e trincas que ocorrem nas juntas de solda, em geral nas aplicações que possuem um ambiente agressivo, destacando-se a indústria militar, automotiva e aviônica.

Assim, 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** de soldagem. Com essas duas ferramentas da qualidade pretende-se obter a otimização do processo de soldagem.

Deste modo, este trabalho tem por objetivo apresentar a uma análise do processo de soldagem (por resistência elétrica com eletrodos paralelos – do inglês *parallel-gap resistance welding*) de interconexões entre células solares por análise e projeto de experimentos. Os dados experimentais utilizados neste trabalho foram obtidos por meio de um banco de dados de processo de soldagem de interconexões em células solares. Com os resultados desse trabalho poderão ser obtidos os seguintes benefícios: (1) melhorar e otimizar o processo envolvido na fabricação de painéis solares; (2) disponibilizar dados sobre o processo ao grupo de Engenharia de Produto do INPE; e (3) aumentar o desempenho e da vida útil de painéis solares.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de soldagem

O processo de soldagem consiste em uma técnica utilizada para a união de metais onde ocorre uma verdadeira fusão das partes a serem unidas, na vizinhança da ligação; para auxiliar o processo pode ou não ser utilizado material de adição (CALLISTER, 2008).

Na literatura técnica na língua inglesa existem três tipos de denominação para soldagem: *welding*, *brazing*, *soldering*. O termo *welding* é usado para o processo de soldagem onde os materiais originais são fundidos e unidos, envolvendo altas temperaturas de fusão; o termo *brazing* é um processo de soldagem onde apenas o material de adição é fundido e exige uma temperatura mais elevada quando comparada ao *soldering*, em geral faz uso de solda à base de ligas de estanho e chumbo; já o *soldering* utiliza solda à base de cobre.

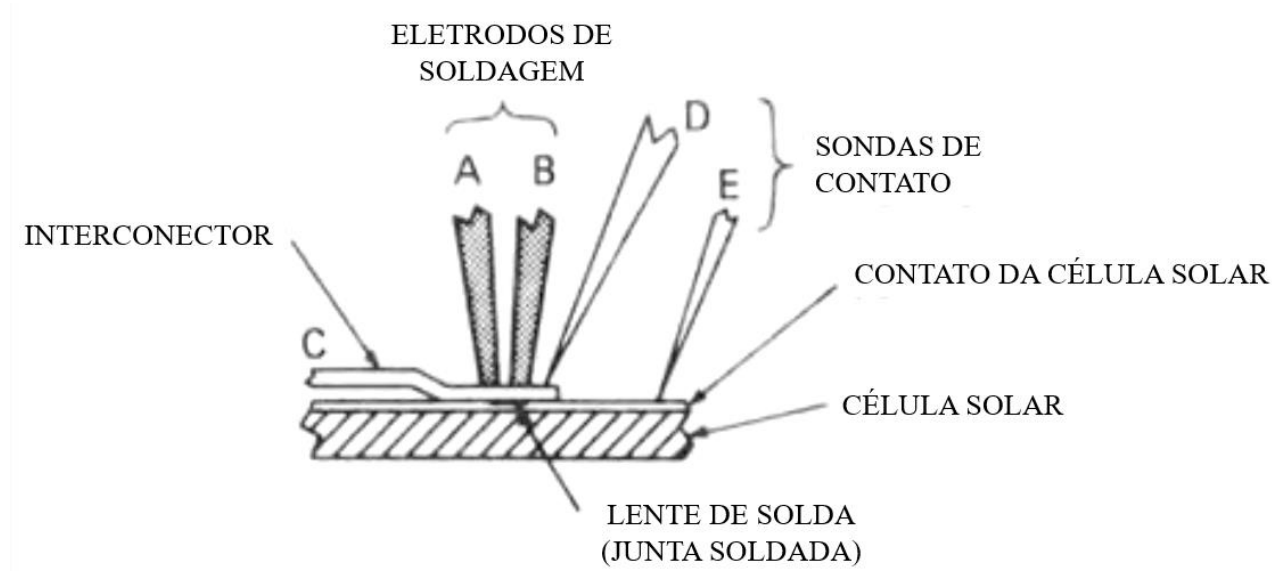
O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica consiste na união de duas peças metálicas por meio da aplicação de uma corrente elétrica através de eletrodos, com objetivo de gerar calor suficiente no

ponto de pressão dos eletrodos, para que o material metálico atinja seu ponto de fusão. Neste instante, a lente de solda (ou lentilha) se forma e, quando a corrente é cessada, a mesma se solidifica produzindo a junção das peças (SOUZA *et al.*, 2013).

Para soldagem de interconexões em células solares é utilizado o processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos, apresentado na Figura 1. O processo de soldagem consiste em: um par de eletrodos espaçados numa distância pré-determinada entra em contato com a peça (interconector da célula solar); a corrente elétrica flui através dos eletrodos e 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 (ponto de fusão ou acima); a pressão exercida pelos eletrodos na peça de trabalho facilita a junção. (STEINMEIER, 2010 e RAUSCHENBACH, 1980).

Segundo Rauschenbach (1980), este é o único processo de soldagem prático para interconexões de células solares.

Figura 1. Soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos. Adaptada de Rauschenbach (1980).



2.2 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem (cada um com um determinado valor e uma adequada combinação entre eles) estabelecem as condições que produzem o processo de soldagem, tornando possível a junção dos materiais. Os valores corretos é que determinam a qualidade da solda (AURES, 2006).

De acordo com os autores An *et al.* (2014), Ávila e Bracarense (2017), os três parâmetros principais de soldagem por resistência elétrica são: corrente de soldagem, força ou pressão de aplicação dos eletrodos, e tempo de soldagem.

A resistência elétrica da peça envolvida no processo de soldagem é de extrema importância, pois é responsável pelo Efeito Joule, porém não é considerado um parâmetro de soldagem (AURES, 2006).

A Tabela 1 apresenta o resultado de uma pesquisa bibliográfica dos fatores e/ou parâmetros de entrada considerados mais significativos numa análise de processo de soldagem por resistência a ponto por diversos autores.

Tabela 1. Resultado de pesquisa bibliográfica dos fatores de entrada e variáveis de resposta. Fonte: Autores.

Autor e Ano	Fatores de Entrada considerados				Variáveis de resposta	
Atashparva e Hamed (2018)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	Altura e Ø da lente de solda
Amaral <i>et al.</i> (2018)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	-
Liu (2017)	Corrente de Soldagem	-	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	-
Ávila e Bracarense (2017)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	-	-	Ensaio de torção	-
Valera <i>et al.</i> (2017)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	-	-	Teste de tração	-
Yue <i>et al.</i> (2016)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	Energia de ativação
Abrahão <i>et al.</i> (2015)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	-
An, <i>et al.</i> (2014)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	-
Souza <i>et al.</i> (2013)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	-
Muhammad <i>et al.</i> (2012)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	-	Tempo de espera	Largura da ZTA*	Raio da lente de solda
Junior (2011)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	Tempo de pré-pressão do eletrodo	Teste de tração	-
Kim <i>et al.</i> (2007)	Corrente de Soldagem	Tempo de Soldagem	Força do Eletrodo	-	Teste de tração	Indentação do eletrodo

Legenda: *ZTA – Zona Termicamente Afetada; Ø – diâmetro.

2.2.1. Corrente de soldagem

Neste tipo de soldagem, pode ser usada tanto a corrente contínua (CC) como a corrente alternada (CA). Neste presente trabalho foi empregada a corrente contínua. A intensidade da corrente de soldagem é responsável pelo aquecimento da área soldada (JUNIOR, 2011); e, conforme a temperatura atinge um determinado valor, ocorre a fusão entre os materiais que estão sobrepostos (AMARAL, 2011). Este parâmetro possui um valor adequado compreendido entre um limite mínimo e máximo que depende do material das peças, da espessura, além da área de contato entre os eletrodos e a peça a ser soldada (SANTOS, 2013).

Ainda segundo Santos (2013), uma corrente de soldagem abaixo do limite mínimo não alcança aquecimento e fusão adequados na região da junta soldada. Em contrapartida, uma corrente mais alta que o limite superior ocasiona um aumento desnecessário da Zona Termicamente Afetada (ZTA) pelo calor, além do aquecimento demasiado da região da solda, que pode acarretar deformações plásticas das peças a serem trabalhadas e penetração exagerada dos eletrodos.

2.2.2. Tempo de soldagem

O tempo de soldagem é compreendido como a duração da distribuição de corrente de soldagem para que se possa produzir o ponto de solda. Um tempo de solda muito curto requer uma corrente de soldagem mais alta, a fim de alcançar o calor necessário para a fusão do material (AURES, 2006); pouco tempo de solda não

funde o material, além de não produzir uma solda de boa qualidade, o que torna crítico o controle apropriado do tempo da solda.

Em contrapartida, o tempo superior de soldagem pode produzir a saída do metal fundido da junta soldada, ou seja, expulsar o líquido, diminuindo a seção transversal da junta e resultando em uma solda descontínua e fragilizada, além de o aquecimento demasiado do metal de base provocar a sua ebulição gerando porosidade gasosa e uma perda de calor por meio dos eletrodos e das peças envolvidas na soldagem, afetando a eficiência do processo (MILLER, 2010; CARNEIRO e BARBOSA, 2015).

2.2.3. A pressão ou força de aplicação do eletrodo na peça

A pressão ou a força de aplicação do eletrodo tem o objetivo de prender, segurar, unir as peças que estão envolvidas no processo de soldagem, por meio de pressão antes, durante, e depois do fornecimento da corrente (AURES, 2006).

A força que o eletrodo exerce sobre a peça não deve ser excessiva uma vez que, quanto maior for a força, menor será a resistência de contato (R_c), gerando um calor insuficiente para a soldagem.

Um excesso de pressão do eletrodo na peça a ser soldada pode ocasionar a fratura da solda, desgaste das peças de trabalho devido à penetração dos eletrodos, deformação dos eletrodos (DIAS, 2011) e, no caso das células solares, danos, trincas e até mesmo a quebra, pois são componentes frágeis.

2.3 Falhas nas interconexões das células solares

No processo de fabricação de painéis solares, as células solares são conectadas umas às outras por meio do processo de soldagem do interconector (na forma de fitas metálicas ou fios) em cada uma das células, formando os módulos solares. O processo de soldagem dos interconectores nas células solares é considerado uma etapa crítica na fabricação de painéis solares (GIERTH *et al.*, 2012; WIESE *et al.*, 2010).

Uma das ameaças consideráveis para a integridade das juntas soldadas são as falhas devidas à fadiga (fadiga é uma medida da resistência a cargas cíclicas mecânicas ou térmicas, segundo Brito (2014)). A fadiga estabelece o início e a propagação das trincas e, conseqüentemente, a falha da junta de solda.

O mecanismo de falhas em juntas soldadas mais comum, segundo a literatura, é causado por trincas que são, de forma fundamental, um mecanismo de fadiga de baixo ciclo, e segue o modelo de *Coffin-Manson* (BRITO, 2014).

A ciclagem térmica na qual os materiais que constituem o painel solar estão expostos no espaço, produza expansão e contração dos materiais, acarretando fadigas e, conseqüentemente, falhas nas juntas soldadas das interconexões, devido às diferenças dos coeficientes de expansão térmica dos materiais soldados (FERRO *et al.*, 1997); isso afeta diretamente a confiabilidade do painel solar durante a sua fase operacional. Segundo Gierth *et al.* (2012), o fator principal que contribui para as falhas que acontecem em órbita é devido à expansão térmica que ocorre entre o material da célula solar e da interconexão entre elas. Segundo Brennan *et al.* (1994), as falhas de juntas soldadas nas interconexões das células solares podem comprometer ou até mesmo incapacitar o painel solar de fornecer energia aos subsistemas do satélite ou veículo espacial do qual fazem parte.

2.4 Projeto de Experimentos

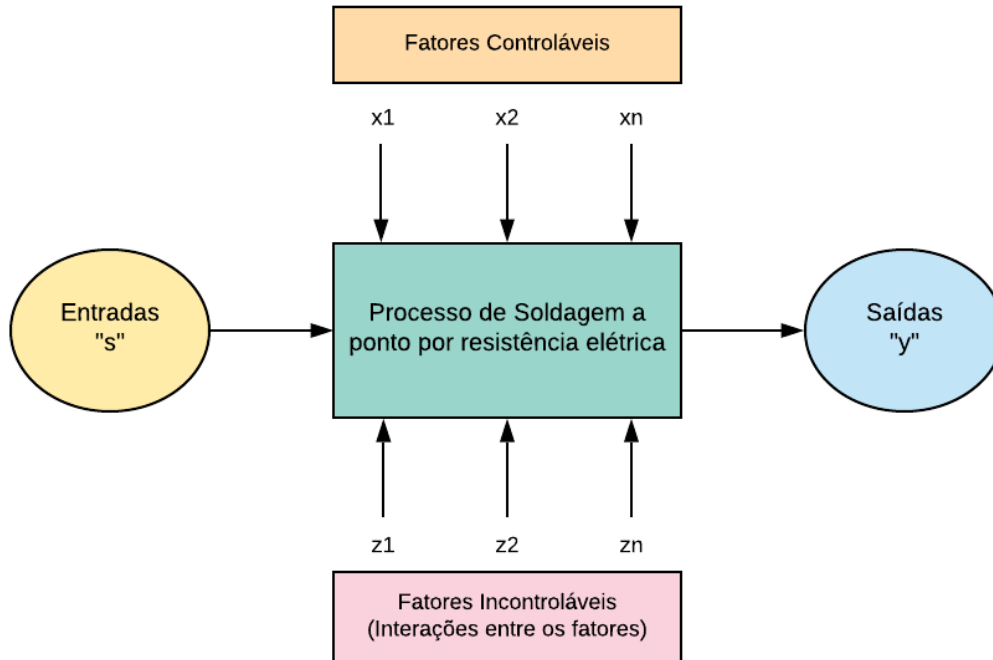
Projeto de experimentos é uma técnica experimental utilizada para manipular as entradas de um processo, a fim de entender melhor seus efeitos sobre as saídas do processo (DYADEM PRESS, 2003).

A técnica de projeto de experimentos é uma poderosa ferramenta aplicada à investigação dos efeitos causados pelos parâmetros de processo, os quais afetam significativamente a (s) resposta (s) de processos (SOUZA *et al.*, 2013).

A Figura 2 representa o processo como uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas ou outros recursos que transformam algumas entradas em saídas que tem uma ou mais variáveis de respostas

observadas. Alguns dos fatores do processo são controláveis, já outros são incontroláveis ou os chamados ruídos (por exemplo, a interação entre os fatores).

Figura 2. Modelo do processo em estudo – Adaptada de Montgomery e Runger (2014).



Alguns termos são definidos a seguir para melhor entendimento da técnica do projeto de experimentos:

Fatores de controle são fatores que podem ser mudados de forma intencional no experimento com o objetivo de avaliar os efeitos causados nas variáveis de resposta; e então, permitir determinar os principais fatores do processo (GALDÁMEZ e CARPINETTI, 2001).

Variáveis de resposta são os parâmetros que sofrem algum efeito no experimento, quando mudanças são provocadas intencionalmente nos fatores que controlam máquinas em processos de manufatura. Em experimentos, pode haver uma ou mais variáveis de resposta que sejam importantes de se avaliar (GALDÁMEZ e CARPINETTI, 2001).

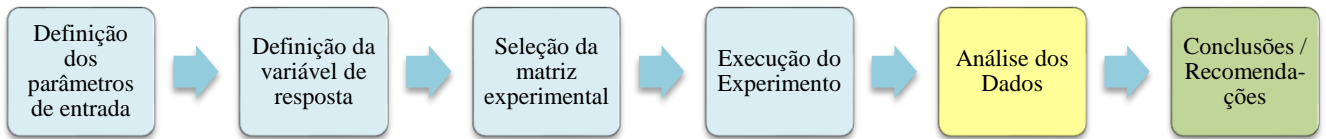
Fatores incontroláveis são fatores que não podem ser mudados de forma intencional no experimento mas provocam efeitos nas variáveis de resposta. Por exemplo: as interações entre os fatores controláveis, também chamados de ruídos por alguns autores; segundo Montgomery (2017), também podem ser as condições ambientais ou as propriedades dos materiais.

Níveis de fatores são as condições de operação dos fatores de controle do processo ou sistema. Quando os testes são realizados determinam-se os níveis ótimos do fator de controle ou o valor mais próximo do especificado pelos projetistas (GALDÁMEZ e CARPINETTI, 2001).

3. METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia adotada neste trabalho é apresentada no fluxograma da Figura 3: em azul estão destacadas as etapas da metodologia (apresentadas na Seção 3), em amarelo os resultados (apresentada na Seção 4) e em verde as conclusões e recomendações (apresentadas na Seção 5).

Figura 3. Fluxograma com os passos da metodologia proposta. Adaptado de Maia *et al.*, 2019.



3.1 Reconhecimento e detalhamento do problema

O primeiro passo da metodologia é o reconhecimento do problema a ser analisado: analisar o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizado em interconexões de células solares por meio da técnica de análise e projeto de experimentos, pois esta é uma etapa crítica na fabricação de painéis solares, que tem grande influência na confiabilidade final do produto.

3.2 Definição dos Parâmetros/Fatores de entrada

A definição dos parâmetros/fatores de entrada para este trabalho primeiramente foi realizada por meio de consulta na literatura técnica, cujo resultado foi apresentado na Tabela 1.

A variável de resposta mais encontrada na literatura, assim como na norma AIAA-S-111A-2014 para avaliar a influência dos fatores de entrada no processo de soldagem é o teste de resistência à tração; porém, sabe-se que existem outros meios de avaliação, entretanto, com custo mais elevado e uma maior demanda de recursos humanos, financeiros e de infraestrutura (como por exemplo: análise da lente de solda por meio de ensaio de ultrassom ou microscopia, dimensionamento da lente de solda, etc.).

3.3 Planejamento Fatorial Completo

O Planejamento Fatorial Completo segundo Colombari (2004), Souza *et al.* (2013) e Montgomery (2017), é uma técnica experimental que consiste em realizar um experimento com k fatores, sendo que cada um destes fatores é composto por dois níveis (por exemplo: alto e baixo ou inferior e superior). É nesta etapa que são realizados os testes com todas as possíveis combinações dos níveis de fatores pré-estabelecidos.

Junior (2011) afirma que o método fatorial estabelece um modelo ótimo dentro dos níveis estabelecidos para as variáveis, mas não existe uma garantia de que os níveis especificados se encontrem na região ideal de operação; sendo assim, o ótimo local pode ser diferente do ótimo global. O autor cita ainda que, para garantir um melhor desempenho no processo em estudo, a análise de superfície de resposta pode ser uma alternativa.

Para um melhor entendimento do Planejamento Fatorial Completo, um modelo estatístico para um experimento fatorial 2^2 é apresentado na Equação (1). Este pode ser utilizado como exemplo para a execução de experimentos com quantos fatores forem necessários (MONTGOMERY, 2017). Entretanto, vale ressaltar que um número elevado de fatores, torna a técnica inviável, pois é necessário um número maior de experimentos.

$$y = k + k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_1x_2 \quad (1)$$

onde:

k : constante;

k_1 : coeficiente do fator de controle x_1 ;

x_1 : primeiro fator de controle;

k_2 : coeficiente do fator de controle x_2 ;

x_2 : segundo fator de controle;

k_3 : coeficiente da interação entre os fatores x_1 x_2 ;

x_1 x_2 : interação entre o primeiro e o segundo fator de controle.

Para este experimento foi utilizado um fatorial completo (2^4), ou seja, quatro fatores de entrada (força de aplicação do eletrodo na peça [N], dada em número de passos do motor de passos; tensão de soldagem [mV]; tempo de soldagem [ms]; e energia [em unidade de A.s]) foram analisados. A variável de saída utilizada foi o teste de resistência à tração [N].

3.4 Seleção da matriz experimental e execução do experimento

Conforme mencionado anteriormente, o experimento realizado foi com um fatorial completo, houve uma réplica e os testes ocorreram de forma aleatória.

Na Equação (2) é apresentado o cálculo realizado para determinar o número de testes de acordo com a técnica de fatorial completo.

$$2^k = 2^4 = 16 \text{ testes} \quad (2)$$

Na Tabela 2, é apresentada uma matriz experimental genérica, mostrando os fatores A, B, C e D, com a combinação dos níveis mínimos e máximos. Nesta tabela, -1 representa o valor mínimo do fator, e 1 o valor máximo.

Tabela 2: Matriz experimental genérica com fatores A, B, C e D.

Teste	Fator A	Fator B	Fator C	Fator D
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

De acordo com Souza *et al.* (2013), a matriz experimental é uma forma de mostrar todas as possíveis combinações dos parâmetros do processo e seus respectivos níveis.

4. ANÁLISE DOS PARÂMETROS E SUAS INTERAÇÕES–RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Análise dos dados

A análise dos dados obtidos por meio da realização do projeto de experimento pode ser observada na Figura 5. Foram analisadas, preliminarmente, 36 amostras de dados.

Figura 5. Análise dos dados. Extraído do MINITAB® 17.

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	11	0,79645	0,072405	1,65	0,146	
Linear	4	0,03161	0,007903	0,18	0,947	
Força	1	0,00360	0,003605	0,08	0,777	
Tensão	1	0,01883	0,018834	0,43	0,519	
Tw	1	0,01575	0,015746	0,36	0,555	
Q	1	0,01516	0,015164	0,34	0,562	
2-Way Interactions	5	0,02573	0,005147	0,12	0,987	
Força*Tensão	1	0,01887	0,018867	0,43	0,519	
Força*Q	1	0,00275	0,002746	0,06	0,805	
Tensão*Tw	1	0,01689	0,016891	0,38	0,541	
Tensão*Q	1	0,01862	0,018620	0,42	0,521	
Tw*Q	1	0,01709	0,017094	0,39	0,539	
3-Way Interactions	2	0,01870	0,009352	0,21	0,810	
Força*Tensão*Q	1	0,01870	0,018697	0,42	0,520	
Tensão*Tw*Q	1	0,01798	0,017984	0,41	0,528	
Error	25	1,10030	0,044012			
Lack-of-Fit	24	1,08030	0,045013	2,25	0,489	
Pure Error	1	0,02000	0,020000			
Total	36	1,89676				

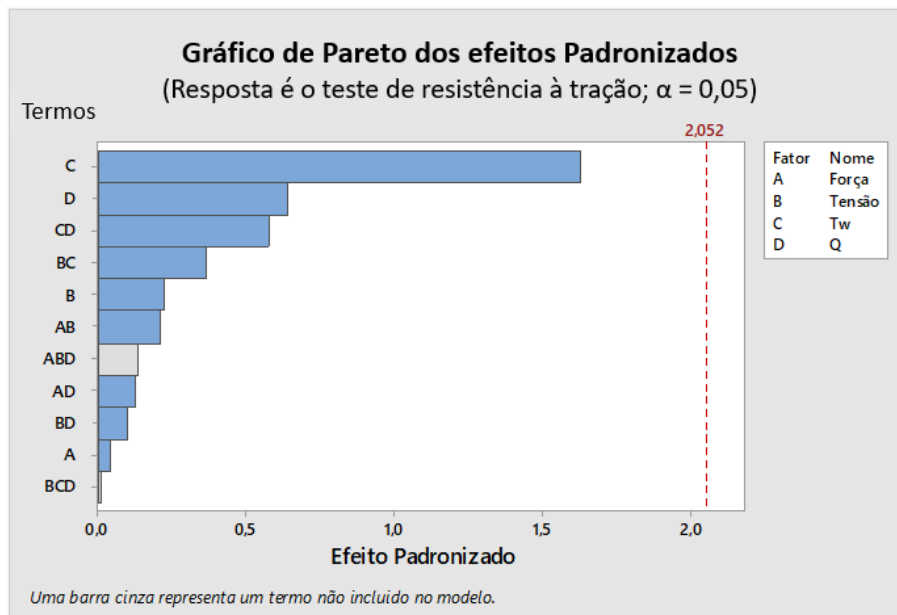
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		30,8	24,1	1,28	0,214	
Força	0,841	0,420	0,791	0,53	0,600	143,51
Tensão	-67,0	-33,5	27,6	-1,21	0,237	264022,88
T2	149,3	74,7	62,8	1,19	0,247	2119939,20
Tw	-147,6	-73,8	61,7	-1,19	0,244	2012836,56
Q	3,95	1,98	1,98	1,00	0,328	1581,04
Força*Tensão	-0,21	-0,11	1,25	-0,09	0,933	379,31
Força*Q	1,16	0,58	1,57	0,37	0,715	698,15
Tensão*T2	-167,4	-83,7	68,8	-1,22	0,236	1612167,60
Tensão*Tw	171,0	85,5	70,1	1,22	0,235	1475799,43
Tensão*Q	-1,92	-0,96	1,48	-0,65	0,523	407,85
T2*Tw	2,50	1,25	1,48	0,84	0,408	192,29
T2*Q	9,25	4,63	3,78	1,22	0,233	1491,34
Tw*Q	-8,32	-4,16	3,68	-1,13	0,270	1106,12

Legenda: Tw = Tempo de soldagem; Q = Energia.

O Gráfico de Pareto tem como objetivo mostrar os valores dos efeitos padronizados desde o maior até o menor efeito. Este gráfico está representado na Figura 6, e é possível verificar os fatores mais significativos para a variável de resposta: o teste de resistência à tração. É possível verificar que o tempo total de soldagem e a energia são os fatores com maior destaque, porém não ultrapassam a linha de *Lenth* (linha vertical tracejada em vermelho), que é a linha de corte para os fatores considerados significativos.

As interações de terceira e quarta ordem entre os fatores foram desconsideradas no Gráfico de Pareto da Figura 6.

Figura 6. Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Extraído do MINITAB® 17.



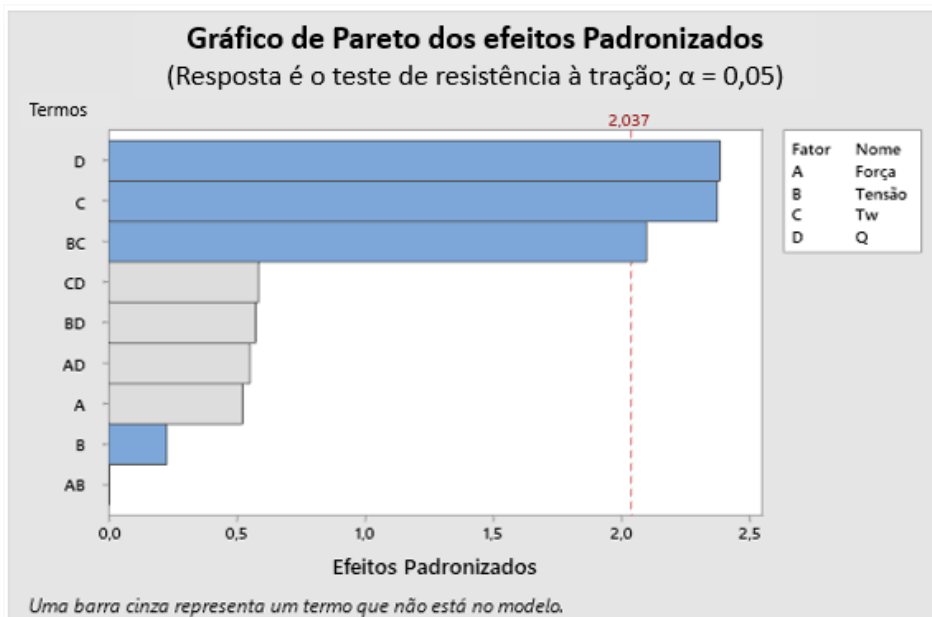
Legenda: Tw = Tempo de soldagem; Q = Energia.

Se forem realizados alguns ajustes no modelo, o Gráfico de Pareto mostrará apenas os fatores significativos, utilizando o método de eliminação do retrocesso, onde todos os fatores são incluídos na análise inicial e depois os fatores não significativos são removidos um por um.

Aplicando o método mencionado acima, nota-se que os efeitos dos fatores D (energia) e C (tempo de soldagem) e a interação BC (Tempo de soldagem * Tensão) se destacam como fatores e interação mais significativos, conforme pode ser observado na Figura 7.

As interações de terceira e quarta ordem entre os fatores foram desconsideradas no Gráfico de Pareto da Figura 7.

Figura 7. Gráfico de Pareto. Extraído do MINITAB® 17.



Legenda: Tw = Tempo de soldagem; Q = Energia.

De acordo com a Equação 1 apresentada anteriormente, o modelo estatístico do experimento fatorial completo realizado nesta análise está representado pela Equação (3):

$$y = 30,8 - 73,8C + 1,98D + 85,5BC \quad (3)$$

onde:

y = resistência a tração (variável de resposta);

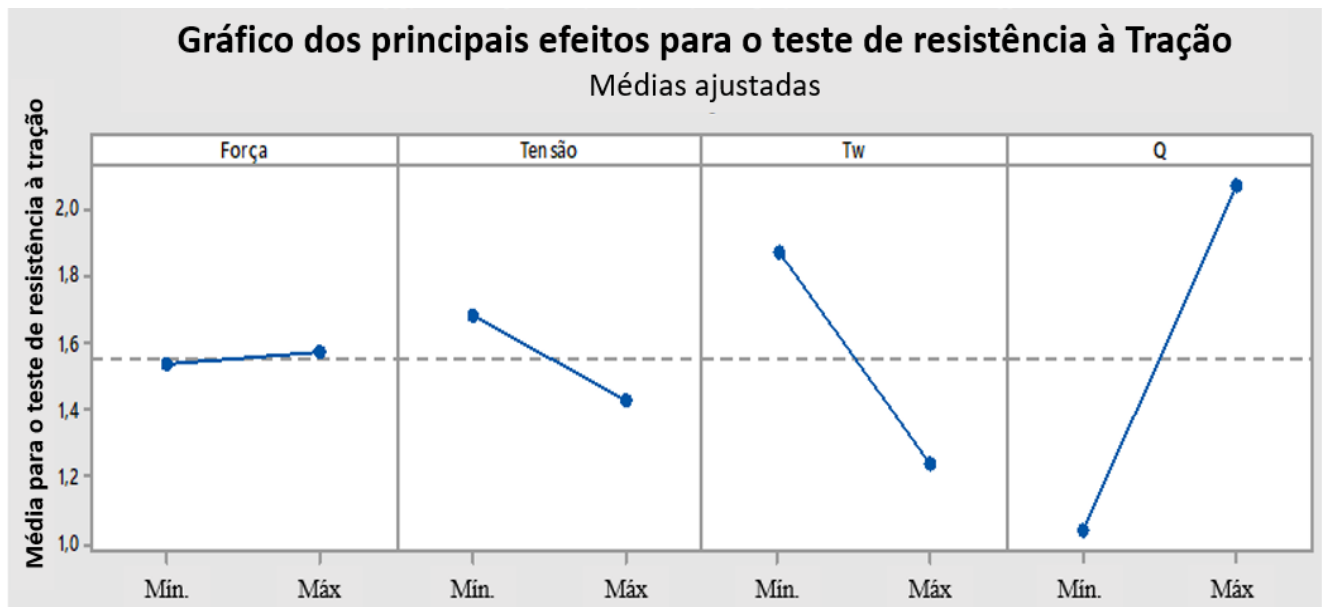
C = fator: tempo de soldagem total

D = fator: Energia

BC = interação dos fatores: tempo de soldagem total e energia.

Os gráficos com os principais efeitos para o teste de resistência à tração são apresentados na Figura 8, onde está representada a variação média do teste de resistência à tração em função dos níveis superior e inferior de cada fator de entrada, mantendo-se os demais constantes.

Figura 8. Gráfico de efeitos principais para o teste de resistência à tração. Extraído do MINITAB® 17.



Legenda: Tw = Tempo de soldagem; Q = Energia.

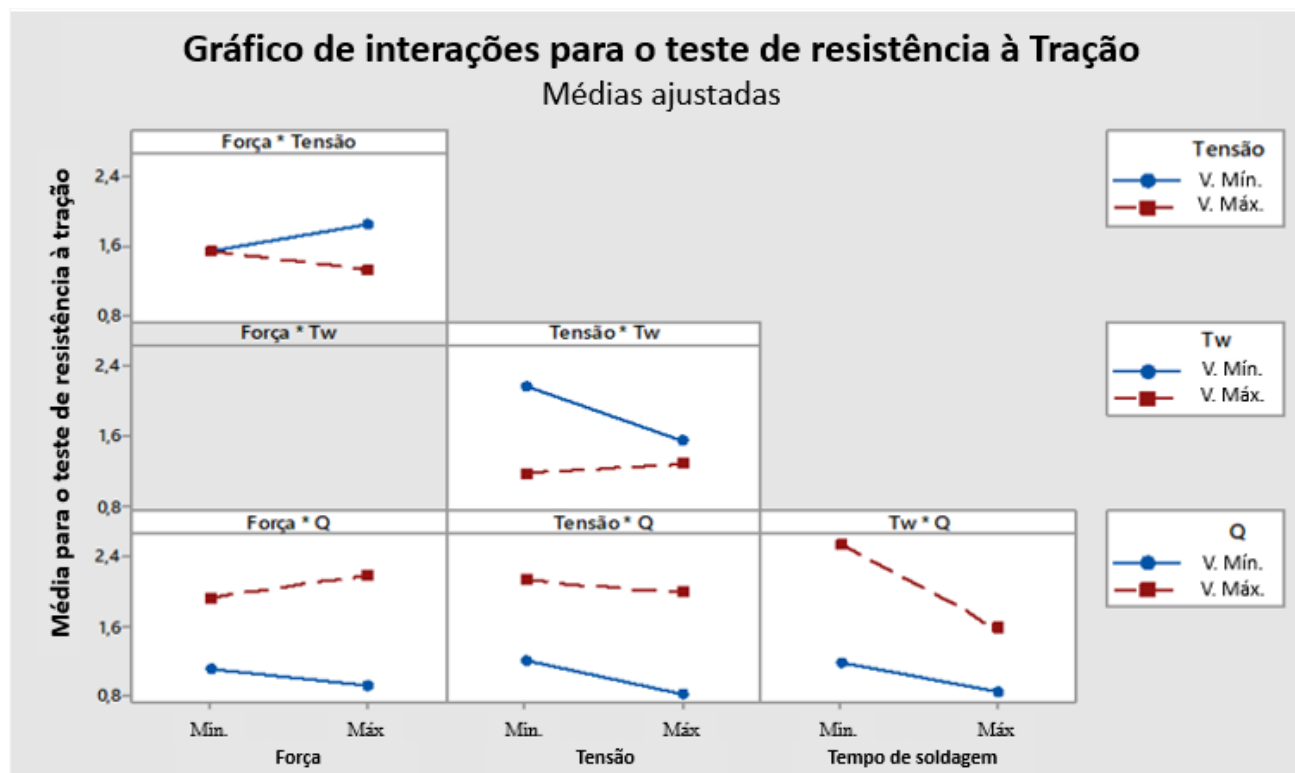
De acordo com Souza *et al.* (2013), a análise dos gráficos apresentados na Figura 8 é realizada com base na variação que a mudança do nível mínimo para o máximo promove na variável de resposta; portanto, quanto maior for a variação na resposta, mais significativo é o fator em análise.

A partir dos gráficos da Figura 8 e baseados na afirmação acima, constata-se que a energia (Q) é o fator que tem maior efeito significativo na resistência a tração. Com um valor superior de energia nota-se um maior valor da resistência a tração.

O tempo de soldagem (Tw) apresentou uma maior resistência à tração quando está no seu limite mínimo; quando o tempo é aumentado há uma diminuição na variável de resposta; o mesmo acontece com a tensão, porém como intensidade menor. A força do eletrodo não apresentou variação significativa, pois está quase na horizontal.

Os gráficos apresentados na Figura 9 mostram a média do valor do teste de tração *versus* as interações entre os fatores. Quanto menos paralelas forem as linhas, maior será a força de interação entre os fatores.

Figura 9. Gráfico de interação entre os fatores *versus* a variável de resposta. Extraído do MINITAB® 17.



Legenda: V. Mín. = Valor mínimo aplicado; V. Máx. = Valor máximo aplicado; Tw = Tempo de soldagem; Q = Energia.

Para o primeiro gráfico tem-se a interação entre a força e tensão versus o fator força. Observa-se que, quando a tensão é mantida no valor mínimo, a interação entre os fatores aumenta; já quando o fator força está no seu valor máximo (linha azul), a mesma análise é válida para a linha vermelha tracejada, que tem o valor da tensão fixado no seu valor máximo. Uma análise semelhante pode ser realizada nos demais gráficos da Figura 9 para os demais fatores.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise preliminar dos parâmetros e suas interações, fatores que influenciam no resultado do processo de soldagem nas interconexões das células solares.

Empregando o projeto de experimento e por meio do planejamento fatorial completo foi possível determinar dentre quatro fatores (parâmetros) de soldagem, os mais importantes para o processo em questão (tensão, força de aplicação do eletrodo, tempo de soldagem e energia); isto é, quais realmente causavam efeitos significativos na resistência à tração. Com auxílio do software de análise estatística MINITAB® 17 detectou-se que os fatores mais significativos nestes testes preliminares foram: energia e tempo de soldagem.

Um aumento na energia causa um aumento na resistência à tração; já com um aumento no tempo de soldagem, a resistência à tração tende a diminuir, assim como para a tensão, porém em escala menor.

Garantir a confiabilidade de sistemas espaciais é um grande desafio, uma vez que esses sistemas operam em ambientes severos (como por exemplo: o vácuo, a ciclagem de temperatura, exposição à radiação e detritos espaciais) e praticamente sem nenhuma manutenção durante a fase operacional.

Por isso se faz necessário uma melhoria contínua de processos envolvidos na fabricação, integração e montagem de sistemas complexos, conferindo assim uma maior competitividade comercial e tecnológica do produto no mercado.

Assim, a técnica de projeto de experimentos se mostrou eficaz em uma primeira análise de melhoria do processo de soldagem. A metodologia foi validada como uma importante ferramenta a ser considerada quando se pretende reduzir custos e quantidade de recursos para fazer experimentos. A utilização desta ferramenta almeja a eliminação de defeitos nos produtos fabricados, além de proporcionar um melhor entendimento da relação entre os fatores envolvidos no processo.

Pretende-se ainda dar continuidade a este trabalho almejando a otimização do processo de soldagem com emprego da metodologia de superfície de resposta. Para isso, será necessário a realização de experimentos adicionais.

REFERÊNCIAS

- AIAA-S-111A-2014., 2014. *Standard: Qualification and Quality Requirements for Space Solar Cells* (AIAA S-111A-2014).
- Abrahão, A. B. R. M., Reis, J. F., Brejão, S. D., Ribeiro, V. G., Costa, M. L., Botelho, E. C., 2015. “Avaliação dos parâmetros tempo, corrente e pressão na soldagem por resistência elétrica de compósitos PEI/fibras contínuas: influência na resistência mecânica”. *Revista Matéria*. Vol. 20, N. 02. ISSN 1517-7076 artigo 11621, pp.530-543.
- Amaral, F. F., Almeida, F. A., Costa, S. C., Leme, R. C., Paiva, A. P., 2018. “Aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta para Otimização do Processo de solda a ponto no aço galvanizado AISI 1006”. *Soldagem & Inspeção*. Vol. 23 (2):129-142 <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2302.02> ISSN 1980-6973 (Online).
- Amaral, F. F., 2011. “Monitoramento da Qualidade na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas Baseado em Análise de Experimentos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, Brasil.
- An, R., Xu, D. 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.
- Atashparva, M., Hamed, M., 2018. “*Investigating Mechanical Properties of Small Scale Resistance Spot Welding of a Nickel Based Superalloy through Statistical DOE*”. *Exp. Tech* 42:27–43 <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0221-2>.
- 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.
- Ávila, T. L. D., 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*. 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”. Dissertação de Mestrado em Gerenciamento de Sistemas Espaciais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, Brasil.
- Brennan, P. S., Jamieson, R. A., Garcia, A., Malchesky, P. A., Simburger, E. J., 1994. “*Evaluation of welded interconnects on thermally cycled silicon solar cells*”. Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC). IEEE. Waikoloa, HI, USA. DOI: 10.1109/WCPEC.1994.520767.
- Brito, A. C., 2014. “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”. Tese de doutorado em Gerenciamento de Sistemas Espaciais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, Brasil.

- Callister, W. D., 2008. *Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução*. 7ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil: LTC. 705p. ISBN 978-85-216-1595-8.
- Carneiro, M. R., D. Barbosa, R. H., 2015. “Estudo dos parâmetros de solda a ponto com ênfase na soldagem de aços galvanizados”. 17p. IFF Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil. Disponível em: <http://bd.centro.iff.edu.br/handle/123456789/24>.
- 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.
- Dias, J. S., 2011. “Uma metodologia para otimização de parâmetros de soldagem através de solda por resistência aplicada a chapa de aço *Interstitial Free IF*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais. Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET. Rio de Janeiro, Brasil.
- Dyadem Press, 2003. *Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis for Automotive, Aerospace and General Manufacturing Industries*. Canada: CRC Press. ISBN 0849319080.
- Ferro, R. J., Francis, R.W., Frasco, E.B., Pan, R.B., Pierre-Louis, E., Sve, C., Berghaus, M., 1997. “*Novel techniques for evaluation of interconnections in solar cells used for spacecraft power generation*”. Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1997. 29 Sept. -3 Oct. 1997. Anaheim, CA, USA, USA. DOI: 10.1109/PVSC.1997.654246.
- Gierth, P., Rebenklau, L., Michaelis, A., 2012. “*Evaluation of Soldering Processes for High Efficiency Solar Cells*”. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. IEEE. Bad Aussee, Austria. DOI: 10.1109/ISSE.2012.6273123.
- Galdamez, E. V. C., Carpinetti, L.C. R., 2001. “Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de fabricação de produtos plásticos”. *Research Gate*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228700842_Aplicacao_das_Tecnicas_de_Planejamento_e_Analise_de_Experimentos_No_Processo_de_Fabricacao_de_Produtos_Plasticos.
- Junior, H. M., 2011. “Uso do planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de um processo de solda por resistência elétrica de pequena escala”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, Brasil.
- Kim, T., Park, H. Rhee, S., 2007. “*Optimization of welding parameters for resistance spot welding of TRIP steel with response surface methodology*”. *International Journal of Production Research*, 43:21, 4643-4657, DOI: 10.1080/00207540500137365.
- Liu, J., 2017. “*A Study on the Influence Factors of Parallel-Gap Welding Heat*”. 18th International Conference on Electronic Packaging Technology 978-1-5386-2972-7/17IEEE.
- Maia, G. F. S.; Brito, A. C.; Souza, M. L. O., 2019. “Metodologia para análise e otimização do processo de soldagem de interconexões entre células solares de painéis solares empregados em satélites artificiais”. In: *Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais*, 10. (WETE), 2019, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2019. On-line. ISSN 2177-3114. IBI: <8JMKD3MGPDW34R/3TTALRS>.
- Miller Welds, 2010. *Handbook for Resistance Spot Welding*. 003 335C. 2010-04. 24p. Disponível em: <https://www.millerwelds.com/-/media/millerwelding>.
- Montgomery D. C., 2017. *Design and Analysis of Experiments*. Ninth Edition. Wiley, 749p. ISBN: 9781119113478
- Montgomery D. C., Runger, G. C., 2014. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Sixth Edition. Wiley, 832p. ISBN-13 9781118539712.
- Muhammad, N., Manurung, Y. H. P., Mohammad, H., Abas, S. K., Tham, G., Haruman, E. 2012. “*Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM*”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (8) (2012) 2365~2370 www.springerlink.com/content/1738-494x DOI 10.1007/s12206-012-0618-x
- O’Connor, P. D. T., Kleyner, A., 2012. *Practical Reliability Engineering*. Fifth Edition. John Wiley & Sons, 512p. ISBN: 9781119961277.

- 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”. 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
- Santos, W. A., 2013. “Estudo da influência dos parâmetros de regulação na soldagem por resistência na indústria automobilística”. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação a nível de especialização em Engenharia de Soldagem), Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, Brasil.
- Souza, M. T. S., Fernandes, M. M., Miranda, R. C., 2013. “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)*. 22 (2): 131 – 140, Jul. – Dez. 2013. ISSN 1983-4071.
- Steinmeier, D., 2010. *Resistance Welding – Parallel Gap Welding Basics*: By David Steinmeier. 04. Arcadia, CA 91007. *Micro Joining Solutions – microTipsTM*.
- Valera, J., Miguel. V., Martinez, A., Naranjo, J., Cañas, M., 2017. “*Optimization of electrical parameters in Resistance Spot Welding of dissimilar joints of micro-alloyed steels TRIP sheets*”. Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2017, 28-30 June, Vigo (Pontevedra), Spain.
- 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 – SP, 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, DF.
- Veissid, N., Vilela, W. A., 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.
- Yue, X. K., Tong, G. Q., Chen, F., Ma, X. L., Gao, X. P., 2017. “*Optimal welding parameters for small-scale resistance spot welding with response surface methodology*”. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22:2, 143-149, DOI: 10.1080/13621718.2016.1204799.
- Wiese, S., Meier, R., Kraemer, F., 2010. “*Mechanical Behavior and Fatigue of Copper Ribbons used as Solar Cell Interconnectors*”. 11th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE. IEEE. Bordeaux, France. DOI: 10.1109/ESIME.2010.5464551